



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



PLACA DE ASIENTO METÁLICA PARA SUPERESTRUCTURA FERROVIARIA DE ALTAS PRESTACIONES.

Trabajo realizado por:

Pablo Setién González

Dirigido:

Isidro Alfonso Carrascal Vaquero

Alejandro Pérez Núñez

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Titulación:

Construcciones Civiles

Santander, Septiembre de 2018

TRABAJO FINAL DE GRADO

Índice

1. Introducción y objetivos	3
1.1 – Placas de asiento. Características y misión dentro de la superestructura ferroviaria	3
1.2 – Objetivos del estudio.....	6
2. La sujeción.....	7
2.1- Definición y características de la sujeción.....	8
2.2- Componentes y clasificación de las sujeciones	10
2.2.1- Clasificación de las sujeciones según los elementos que las forman y su colocación	11
2.2.2- Clasificación de las sujeciones según la naturaleza de los elementos básicos.....	13
2.2.3- Clasificación de las sujeciones según su forma de trabajo	14
2.3- Principales sistemas de sujeciones presentes actualmente en España y sus correspondientes placas de asiento	15
2.3.1- Sujeción RN.....	15
2.3.2- Sujeción P-2	18
2.3.3- Sujeción J-2	21
2.3.4- Sujeción NABLA	23
2.3.5- Sujeción PANDROL.....	26
2.3.6- Sujeción HM (SKL 1).....	30
2.4- Influencia de la placa de asiento en el deterioro de la vía.....	33
3. El material	36
4. Metodología experimental	40
4.1- Caracterización mecánica	40
4.2- Resistencia eléctrica	43
4.3- Corrosión	46
5. Resultados y análisis.....	47
5.1- Caracterización mecánica	47
5.1.1- Geometría prismática	47
5.1.2- Geometría anular	53
5.2- Influencia de la forma.....	56
5.3- Caracterización eléctrica	59
5.4- Comportamiento frente a condiciones adversas	60
6. Conclusiones	61
7. Bibliografía	63

1. Introducción y objetivos

1.1 – Placas de asiento. Características y misión dentro de la superestructura ferroviaria

El mundo del transporte ferroviario ha evolucionado mucho desde sus inicios, los cuales se pueden atribuir a los mineros alemanes alrededor del siglo XVI. Fue ahí donde apareció el primer concepto de ferrocarril: dos “carriles” de madera planos sobre los que se hacían deslizar los vagones en los que transportaban el material extraído. Desde entonces han sido numerosas las mejoras y llamativo el desarrollo en todos los ámbitos de este medio de transporte.

Los carriles de madera pasan a ser guiados en vez de un simple apoyo, y buscando aumentar su resistencia se recubre la madera con placas de hierro fundido (Inglaterra, S.XVIII). Paralelamente se empiezan a desarrollar carriles en L de hierro fundido o perfiles Curr en hierro forjado. A partir de ahí, cambios de secciones del carril buscando mejores resultados: guiado por pestaña, carriles dentados, de cremallera o carriles sin rozamiento como pueden ser los trenes suspendidos con colchón de aire o por levitación magnética. [1]

Las traviesas también han evolucionado, pasando de ser en origen metálicas a fabricarse en madera o sobre todo actualmente hormigón, bien sea armado pretensado o postensado. Este elemento de la superestructura es esencial a la hora de ser el hilo conductor de los esfuerzos ejercidos en los carriles y transmitirlos al balasto, además de aislar eléctricamente ambos carriles. La transición de madera a hormigón es debida a que la madera tiene un mayor deterioro con el tiempo, las sujeciones se debilitan y estabilizan menos la vía por ser más livianas. Sin embargo, el hormigón también tiene ciertos inconvenientes como puede ser su mayor rigidez. Esto hace necesario disponer un elemento elástico entre el carril y la traviesa para evitar fisuraciones en la zona de la sujeción, lo cual provocaría tanto la paulatina pérdida de resistencia a la fatiga como la progresiva destrucción del hormigón. [2]

Es ahí donde entran en juego las placas de asiento. Se trata de un elemento que ha de ser capaz de absorber las vibraciones transmitidas por el tren a través del carril y de esta manera proteger la traviesa. Algunas de las misiones de este elemento son la distribución de la carga en una superficie mayor, centrado de estas cargas en la traviesa para un mejor soporte, reducción del ruido y vibraciones o aislamiento entre carril y traviesa. Los materiales más usados para fabricar estas piezas son elastómeros. Esto es debido a su capacidad de reponerse tras ser sometidos a una carga sin sufrir deformaciones permanentes, y en este caso también resulta interesante que es aislante eléctrico ya que sirve como barrera entre el carril y la traviesa. Dentro de los elastómeros resultan de especial interés los termoplásticos. Este tipo de elastómero se caracteriza, además de lo citado anteriormente, por la posibilidad de aumentar su temperatura y de esa manera realizar coladas para moldearlo por inyección. [3] Otro punto por el cual estos materiales han ido tomando cada vez más importancia dentro del mercado es su capacidad de poder ser reciclados y reutilizados como plásticos. Esta característica es de gran importancia dada la problemática actual de producción de residuos, en la que la reutilización y reaprovechamiento de recursos usados es un punto clave a potenciar. Aun así, hay que tener en cuenta que con cada reciclado y reutilizado las propiedades del elastómero varían y hay que tener en cuenta que las aplicaciones para las que podrá ser usado el material reciclado no serán las mismas. Además, cuando se llega a un cierto grado de reciclaje el material no puede ser revalorizado correctamente como material útil. Llegado a este punto la salida por la que se puede optar es utilizarlo como relleno en vertederos o, como última opción, incinerarlo.

El elastómero colocado en la vía está expuesto a fenómenos ambientales y meteorológicos tales como las variaciones de temperatura, la humedad, la luz, los rayos UV o la composición del aire. La combinación de estos factores oxida las moléculas de caucho, lo cual sumado a los esfuerzos mecánicos transmitidos por el tren como el peso propio del mismo o las vibraciones hace que el material empeore. Este deterioro de las propiedades de la placa de asiento ha de tenerse controlado por el impacto general que tiene en toda la superestructura. Con el tiempo la placa de asiento pierde espesor y se rigidiza, lo cual causa una transmisión de fuerzas

mayor a la traviesa, así como pérdida de la resistencia longitudinal y debilitamiento de las sujeciones. El aumento de la presión transmitida en la traviesa afecta igualmente a la cama de balasto, por lo tanto, este sufrirá más desperfectos. Con todo ello, la amortiguación que puede proporcionar la superestructura al vehículo decrece por lo que la cabeza del raíl sufre más desgaste y aumenta el ruido generado por el tren. [4] Todo ello supone un aumento a la larga en los costes de mantenimiento de la vía. Para evitar esto, es preferible renovar las placas de asiento antes de que los daños sean importantes.

El período de vida útil de las placas de asiento por tanto no es el mismo en cualquier lugar. Una estimación correcta de la vida media de las placas de asiento teniendo en cuenta únicamente el deterioro por causas ambientales y sin fisuras ni deformaciones no tolerables según la Especificación Técnica correspondiente es de unos 15 años. Sin embargo, zonas como los Emiratos Árabes en las cuales las condiciones climáticas son extremas el material se degrada más rápido. En estos parajes el material trabaja en un ambiente seco, a temperaturas cercanas a los 50 grados centígrados durante el día en verano e igualmente a prácticamente cero grados en invierno. [5] En estas condiciones la estructura molecular del elastómero se deteriora más rápido, con lo cual la rigidez del material aparece antes y por ende las vibraciones en la estructura que hacen necesario la renovación de las placas de asiento.

Precisamente en los Emiratos Árabes se está apostando actualmente muy fuerte por el transporte ferroviario. Comandado por el proyecto “Etihad Rail” que consta de prácticamente 1200 kilómetros de vía que recorrerán el país desde la frontera con Arabia Saudí hasta la frontera omaní y que pretende ser la arteria de transporte principal del país tanto de pasajeros como de mercancía, el país tiene en marcha o planificados 15 proyectos valorados en prácticamente 14 mil millones de dólares. [6] En estas vías, sobre todo en las de altas prestaciones como el Etihad Rail, la superestructura ferroviaria ha de estar bien diseñada y estudiada para que pueda resistir correctamente la actividad a la que va a estar sometida durante su ciclo de

vida. Es por ello por lo que, dados los problemas anteriormente citados que pueden sufrir las placas de asiento dadas las condiciones climáticas de la zona, se planteen alternativas a los materiales convencionales y se sometan a estudio para comprobar su viabilidad mecánica. Una de estas opciones es reforzar el propio elastómero, cambiar su composición para así resistir mejor las variaciones de temperatura y que su comportamiento frente a los esfuerzos no se vea tan comprometido. La otra opción consiste en buscar otro tipo de material que cumpla las características mecánicas que se le exigen a los elastómeros y que además resista mejor las condiciones climáticas sin grandes variaciones en su comportamiento.

1.2 – Objetivos del estudio

En el trabajo a desarrollar se plantea la viabilidad de utilizar como sustituto del elastómero un cojín de asiento realizado a base de una malla de alambre de acero inoxidable tricotado, gofrado y prensado. Esta solución pretende ser una alternativa en situaciones donde los materiales convencionales se deterioran rápidamente y así poder alargar la vida útil del componente.

Mediante los ensayos a realizar se busca estudiar las variaciones de las rigideces, tanto estática como dinámica, del cojín de acero y de otros cojines de distintos tipos de elastómeros. Dentro del ensayo para la rigidez dinámica se estudiarán las rigideces a tres frecuencias distintas para poder observar la variación del comportamiento en distintas situaciones de trabajo. También es analizada la influencia de la acción de cargas repetitivas y la fatiga sobre las propiedades mecánicas.

Además. Con el fin de estudiar la variación de la densidad y la influencia de la geometría sobre el comportamiento estático y dinámico de la misma, 3 geometrías distintas son analizadas, variando el peso de las muestras dentro de cada uno de los casos, y caracterizando la rigidez de las mismas.

2. La sujeción

La superestructura ferroviaria está constituida por varios elementos. Cada una de estas partes cumple una función dentro del conjunto, y la interacción de todos ellos tiene como objetivo el ofrecer una respuesta óptima para el correcto funcionamiento del transporte ferroviario.

El elemento sobre el que se apoya y circula el vehículo es el carril. La función de este no es otra que la de soportar las cargas transmitidas a través de las ruedas, así como guiar el vehículo. Los esfuerzos a los que está sometido, y que por tanto ha de resistir satisfactoriamente, son las cargas verticales estáticas del peso y dinámicas, transversales causadas por el movimiento oscilatorio del vehículo y las fuerzas centrífugas, y longitudinales debidas a las dilataciones térmicas. Igualmente, este elemento cumple como conductor de la corriente eléctrica para las señalizaciones.

Las traviesas son los elementos transversales al eje de la vía que se encargan tanto de mantener el ancho de vía entre los carriles como de soportar los esfuerzos transmitidos a través de los mismo y derivarlos hacia la cama de balasto. Pueden estar fabricadas tanto en madera como en hormigón armado o pretensado, siendo las del último material las más comunes hoy en día. Las traviesas también cumplen la función de aislante de la corriente eléctrica que corre por el carril y la de acomodar el asiento del patín del carril, para lo cual se dotan de una cierta inclinación.

El balasto es el material granular sobre el que descansan las traviesas. El tamaño de las piedras oscila entre 2 y 5 cm, y proceden del machaqueo de rocas de naturaleza silíceas y preferentemente ígneas o metamórficas, siendo descartadas por tanto las de naturaleza caliza o dolomítica. [7] Este material trabaja por rozamiento, soportando de esta manera las cargas de la vía. Además, funciona como un lecho elástico que absorbe y amortigua las vibraciones causadas por la

circulación de los ferrocarriles. De esta manera se reduce el ruido y hace más confortable la circulación para los pasajeros. El balasto permite ajustar con precisión la rasante y el peralte de la vía, permite un buen drenaje de las aguas procedentes de las precipitaciones y evita que la vegetación aflore en la plataforma y cause daños a los componentes que la componen.

El último elemento de la superestructura es la sujeción, que a su vez es el conjunto de componentes encargados de fijar el carril a la traviesa.

En la Figura 1 se muestra un esquema del corte transversal en la superestructura ferroviaria, donde todos los elementos de esta aparecen referenciados.

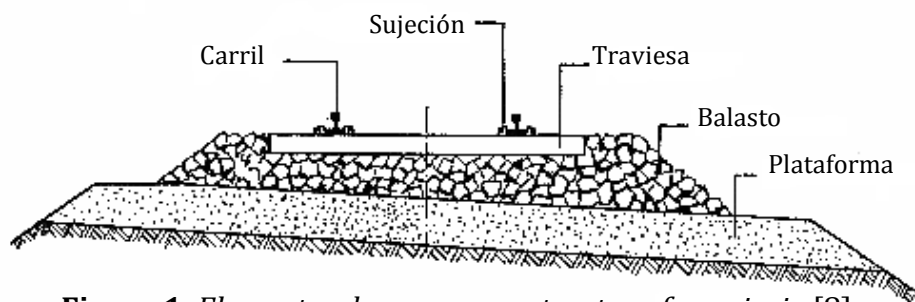


Figura 1. Elementos de una superestructura ferroviaria [8]

2.1- Definición y características de la sujeción

La sujeción es un conjunto de elementos cuyo correcto funcionamiento es esencial para la seguridad y comodidad de los pasajeros. Estos elementos se encargan de fijar el carril a la traviesa. Con el paso de los años tanto las cargas por eje como las velocidades de los vehículos ferroviarios han ido aumentando, lo cual ha hecho necesaria la evolución y mejora de los sistemas de sujeción.

Las misiones y requerimientos a cumplir por este elemento de la vía también se han ido modificando a lo largo del tiempo. Así como en sus inicios se encargaban

básicamente de evitar el vuelco y desplazamiento lateral de los carriles, los sistemas actuales han de diseñarse para otros requerimientos como mantener el ancho de vía constante o resistir los esfuerzos longitudinales generados por la dilatación térmica en carriles soldados. Otro punto a resaltar es la aparición de las traviesas de hormigón, ya que generó la necesidad de incluir un material elástico entre ésta y el carril dada su elevada rigidez. Ese elemento es la placa de asiento.

Las características básicas generales que se le exigen a los sistemas de sujeción son las siguientes:

- Resistencia mecánica y elasticidad adecuada para la vía, e invariable a lo largo de su vida útil.
- Estar constituidos por el menor número de componentes posible, y que estos sean lo más geométricamente sencillos para facilitar su fabricación, montaje, conservación y sustitución cuando sea necesario.
- Coste de fabricación y explotación bajo.
- Vida útil elevada.
- Aislar eléctricamente ambos hilos del carril en líneas electrificadas o dotadas de sistemas de señalización que así lo exijan.

Las sujeciones deben ser capaces de absorber ciertos esfuerzos transmitidos por el carril con el fin de mantener la posición relativa entre este y la traviesa. Esos esfuerzos van a depender de varios factores de distintas índoles como las cargas y características dinámicas del vehículo, geometría y estado de conservación de la línea o variaciones de la temperatura. En los tramos de vía rectos los esfuerzos a tener en cuenta son los verticales transmitidos por las ruedas, longitudinales debido a las tensiones térmicas en el carril y transversales tanto por el movimiento de lazo como por impactos producidos por posibles desperfectos en ruedas y vía. En las curvas aparecen otro tipo de esfuerzos transmitidos por las pestañas del carril al hilo exterior del carril. Esos esfuerzos son los debidos al rozamiento entre pestaña y carril, la aceleración centrífuga, el cabeceo o galope de los bogies o la aceleración de Coriolis en cambios de curvatura en el trazado. [8]

Además de las características resistentes de la sujeción es necesario considerar otra serie de detalles de funcionalidad. Algunos puntos que destacar en este ámbito son los siguientes:

- La frecuencia de vibración propia del sistema de sujeción debe ser mayor que la del carril para que no se pierda el contacto entre ambos al paso de los ejes.
- La fuerza de apriete del carril sobre la traviesa ha de ser suficiente para que el esfuerzo de rozamiento entre ambos componentes sea superior a la resistencia al deslizamiento de la traviesa sobre el balasto en sentido longitudinal. Además, el valor de esa fuerza ha de ser suficiente a lo largo de toda la vida útil de la sujeción.
- El recorrido elástico de los elementos de apriete ha de permitir que la sujeción mantenga un comportamiento elástico óptimo aún estando sometida a la deformación máxima que se haya previsto.
- El montaje y desmontaje de las piezas de sujeción tiene que poderse realizar correctamente con medios mecánicos de alto rendimiento para reducir al máximo los períodos de corte de vía necesarios por actividades como liberación de tensiones en carriles soldados. Las características elásticas del elemento deben mantenerse intactas después de varios montajes y desmontajes.
- Es necesario que el control de apriete sea sencillo de realizar y que se pueda hacer sin necesidad de desmontar la sujeción. Además, la sustitución de componentes deteriorados debe ser sencilla de llevar a cabo.

2.2- Componentes y clasificación de las sujeciones

Para poder clasificar los diferentes tipos de sujeciones hay que determinar primero los distintos componentes que pueden incluir, pero los cuales no deben de estar incluidos necesariamente en todas las variedades de sujeciones. Cada elemento posee su función específica dentro del conjunto. A continuación, se mencionan los componentes:

- **Elementos de anclaje de la placa:** aquellos que mantienen la placa unida a la traviesa.
- **Elementos de anclaje a la placa:** los elementos que unen todo el conjunto de la sujeción a la placa.
- **Elementos de anclaje del carril:** cumplen la función de mantener el carril en contacto con la placa de asiento, o bien con la traviesa si esta última no formase parte de la sujeción.
- **Placa de asiento:** elemento situado entre carril y traviesa que puede ser rígida o elástica. La placa de asiento rígida protege la traviesa reduciendo la presión específica que transmite el carril, mientras que la elástica amortigua estos esfuerzos y hace que la vía posea una cierta elasticidad.
- **Elementos de anclaje a la traviesa:** unen todo el conjunto de la sujeción a la traviesa.
- **Otros:** elementos aislantes, guía del carril, elásticos.

2.2.1- Clasificación de las sujeciones según los elementos que las forman y su colocación

Dependiendo de los elementos que componen la sujeción y la disposición de los mismos podemos clasificar las sujeciones en tres categorías [9]:

- **Sujeciones directas:** la fijación del carril, y la placa de asiento si corresponde, a la traviesa se realiza a través de un único elemento o grupo de elementos, trabajando juntamente con elementos auxiliares en caso de que los haya.

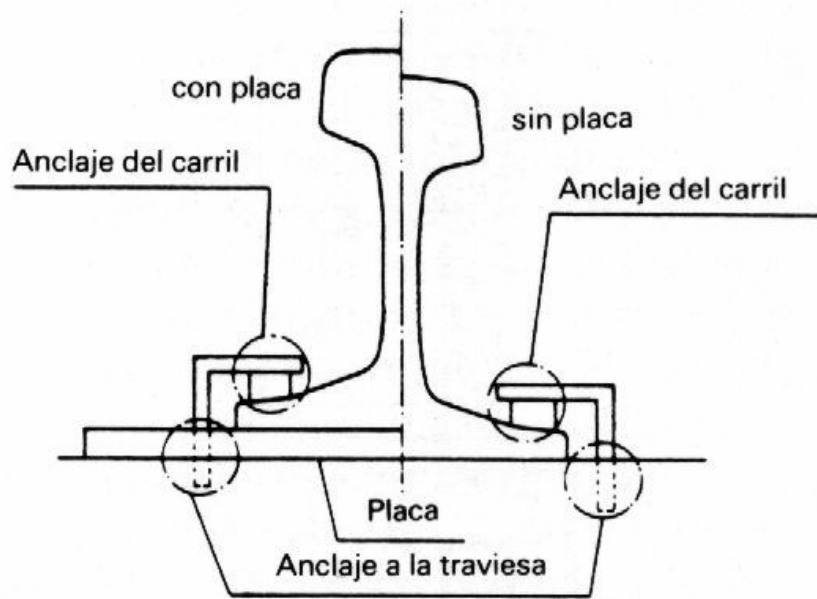


Figura 2. Sujeción directa [9]

- **Sujeciones indirectas:** en este caso el anclaje de la placa a la traviesa y la fijación del carril a la placa es realizado por elementos o grupos de elementos independientes, pudiendo colaborar o no elementos auxiliares.

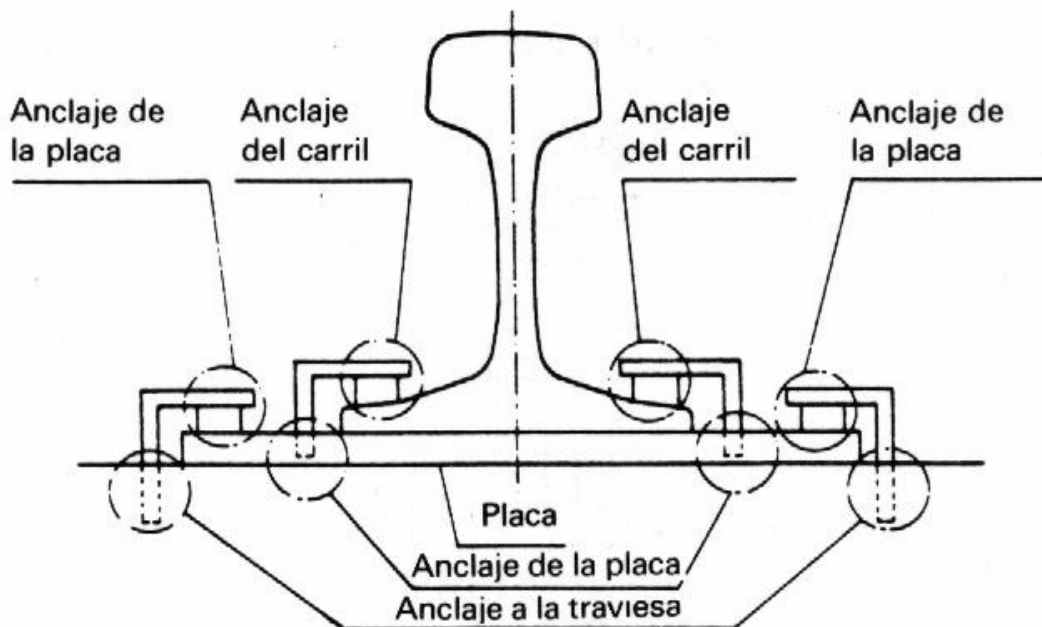


Figura 3. Sujeción indirecta [9]

- **Sujeciones mixtas:** se cumplen condiciones de las dos sujeciones anteriormente mencionadas, ya que existe un elemento o grupo de elementos encargados de anclar únicamente la placa y además existen otros elementos o conjunto de elementos que actúan como anclajes tanto del carril como de la placa a la traviesa.

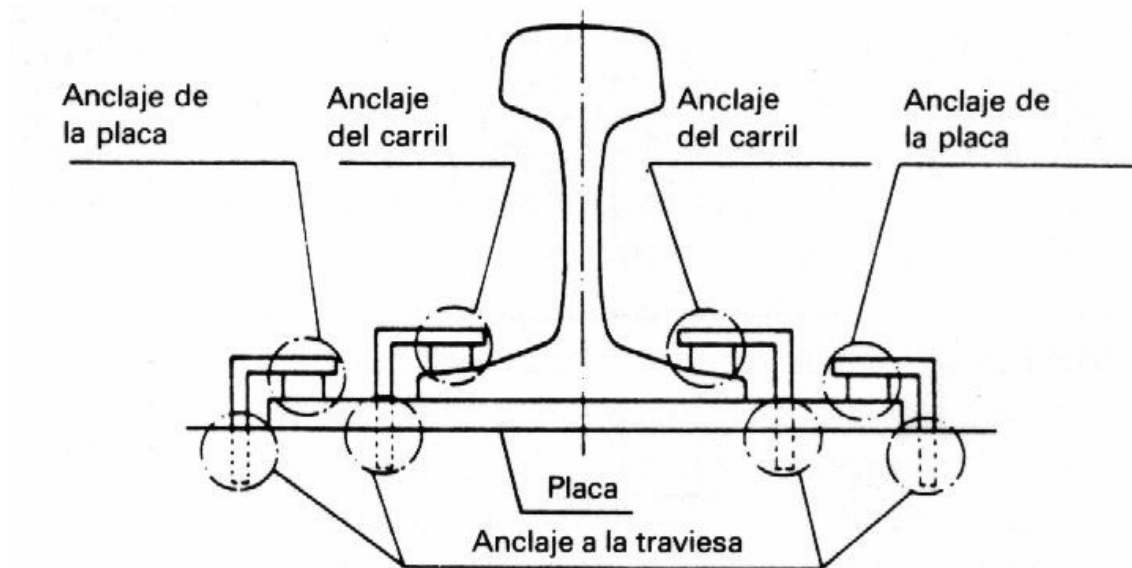


Figura 4. Sujeción mixta [9]

Todas las sujeciones son soluciones óptimas siempre que se justifique su elección. La única que a priori puede representar una solución más ventajosa es la directa ya que por lo general el número de piezas que requiere es menor al de las otras dos.

2.2.2- Clasificación de las sujeciones según la naturaleza de los elementos básicos

Según la naturaleza de los elementos que componen la sujeción, podemos clasificar las mismas en dos tipos [10]:

- **Sujeciones rígidas:** los esfuerzos se transmiten del carril a la traviesa mediante elementos rígidos. Este tipo de sujeciones suelen ser para traviesas de madera.
- **Sujeciones elásticas:** la transmisión de los esfuerzos del carril a la traviesa se realiza a través de elementos o conjunto de elementos flexibles. La misión de estos puede ser de fijación del carril a la traviesa, de fijación del carril a la placa y de fijación de la placa a la traviesa. Estas sujeciones las

podemos subdividir en otros dos grupos: elásticas simples o doblemente elásticas. Los componentes de las simples desarrollan únicamente una de las funciones anteriormente mencionadas. Sin embargo, en las doblemente elásticas la sujeción del carril a la placa y la de esta a la traviesa se realiza a través de elementos o conjuntos de elementos elásticos.

Técnicamente, si nos ceñimos al significado de la palabra elasticidad como la propiedad de los materiales de recuperar la deformación sufrida por cierto esfuerzo al cesar el mismo, ambos tipos de sujeciones serían elásticos. La diferencia fundamental por tanto entre ambas clases es la cantidad de deformación sufrida por la sujeción sometida a esfuerzo. Las sujeciones rígidas por tanto son las que sufren deformaciones muy pequeñas pero recuperables, mientras que las sujeciones elásticas son capaces de funcionar bajo mayores desplazamientos. Por lo tanto, las denominaciones correctas para los tipos de sujeciones si nos basamos en este desarrollo serían sujeciones elásticas rígidas y elásticas flexibles.

Las sujeciones de tipo rígido son más propensas a sufrir un degradado más rápido que las de tipo elástico. La razón de que esto ocurra se debe a la suma de la acción de las cargas dinámicas sobre la misma junto con el paso del tiempo. En las sujeciones rígidas la absorción de energía es acumulativa. Esto quiere decir que las deformaciones son permanentes y aumentan con el paso del tiempo debido a los esfuerzos sufridos. Esas deformaciones con el tiempo causarán desajustes por la rigidez de los elementos, y por lo tanto será necesario cambiar las piezas pertinentes. Sin embargo, las sujeciones elásticas se caracterizan por poder deformarse más y luego recuperar su forma original gracias a su flexibilidad. Esto le garantiza una vida útil más larga, siempre y cuando no se sobrepasen sus límites elásticos.

2.2.3- Clasificación de las sujeciones según su forma de trabajo

Atendiendo a la manera en la que se anclan los distintos elementos que constituyen el conjunto de la sujeción podemos encontrarnos con las siguientes opciones:

- Clavado sobre madera o materiales sintéticos.
- Adherencia metal-hormigón.
- Soldadura metal-metal.
- Efecto de tornillo entre: metal-madera/metal-material sintético/metal-metal (roscado).
- Efecto de cuña entre: metal-metal/metal-madera/metal-material sintético (acodalamiento).
- Efecto de tope entre: metal-hormigón/metal-metal.

2.3- Principales sistemas de sujeciones presentes actualmente en España y sus correspondientes placas de asiento

El objetivo de este apartado es mostrar los principales sistemas de sujeción elásticos directos utilizados en las obras del país. Este tipo de sujeciones son los más empleados en la actualidad.

Lo que hace que estos sistemas elásticos predominen sobre sus análogos rígidos es su capacidad de amortiguar la energía producida por los choques del carril debidos a su movimiento vertical oscilatorio al paso de la circulación de los vehículos. Unos componentes clave en este funcionamiento son los clips o grapas. Se trata de componentes elásticos cuya misión es apretar el carril sobre la traviesa, funcionando como un muelle y absorbiendo las deformaciones de las placas de asiento.

2.3.1- Sujeción RN

La principal aplicación de este tipo de sujeción es sobre las traviesas de hormigón RS (bloque o mixtas de acero y hormigón). Aun así, puede funcionar en cualquier tipo de traviesa.

La sujeción RN consta de los componentes descritos a continuación [11]:

- Una grapa de doble hoja con un bucle, fabricado en acero al cromo manganeso y cuya hoja superior es mayor a la inferior. Es el elemento

principal de la sujeción, el elemento que proporciona el comportamiento elástico a la misma.

- Un bulón o tornillo de acero cuya cabeza se ancla a la traviesa.
- Una placa de caucho acanalada. 4.5 mm espesor.
- Un sector de caucho que hace las veces de elemento amortiguador y protector de la traviesa de hormigón en la parte más alejada del carril. En caso de traviesas metálicas y de madera también se fija un casquillo metálico a la misma.
- Un casquillo aislante de plástico entre tornillo y grapa.

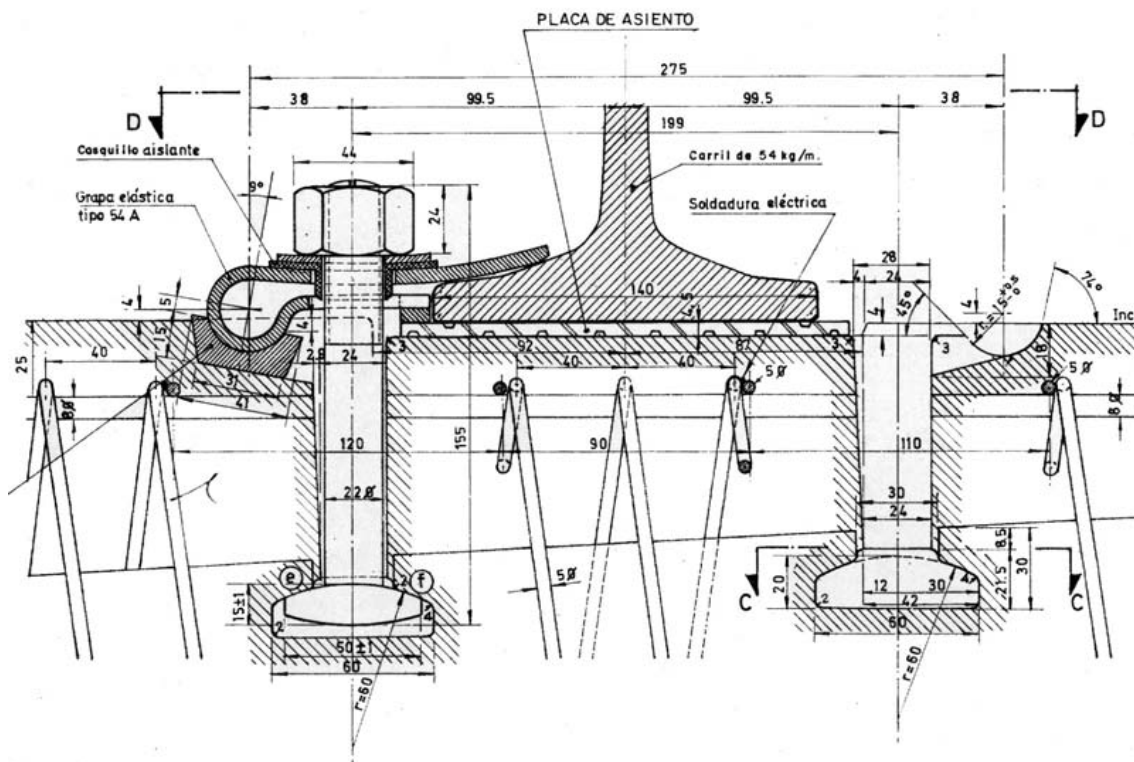


Figura 5. Sujeción RN. [11]

La grapa, anteriormente descrita como el elemento elástico de la sujeción, puede sufrir en montaje un apretado excesivo de los tornillos que fija esta a la traviesa. Si esto ocurre, sus propiedades pueden verse afectadas y por tanto no funcionar como es debido. Se producirían deformaciones plásticas, y se obtendría un comportamiento de sujeción rígida que es lo que precisamente se pretende que no ocurra.

Con el fin de evitar casos como el anterior, las grapas se diseñan con la rama superior de tal forma que sólo puede apoyar sobre el carril en dos líneas paralelas, las cuales se denominan línea de “primer contacto” y de “segundo contacto”. En esta segunda línea no ha de producirse el contacto del patín del carril para no sobrepasar la tensión admisible en la grapa, debiendo de quedar una holgura de entre 0,2 a 05 mm entre esta y el patín en su posición de apretado definitiva. Sin embargo, en la realidad esta situación no se suele cumplir. A continuación, se muestra el apretado correcto de una sujeción del tipo RN.

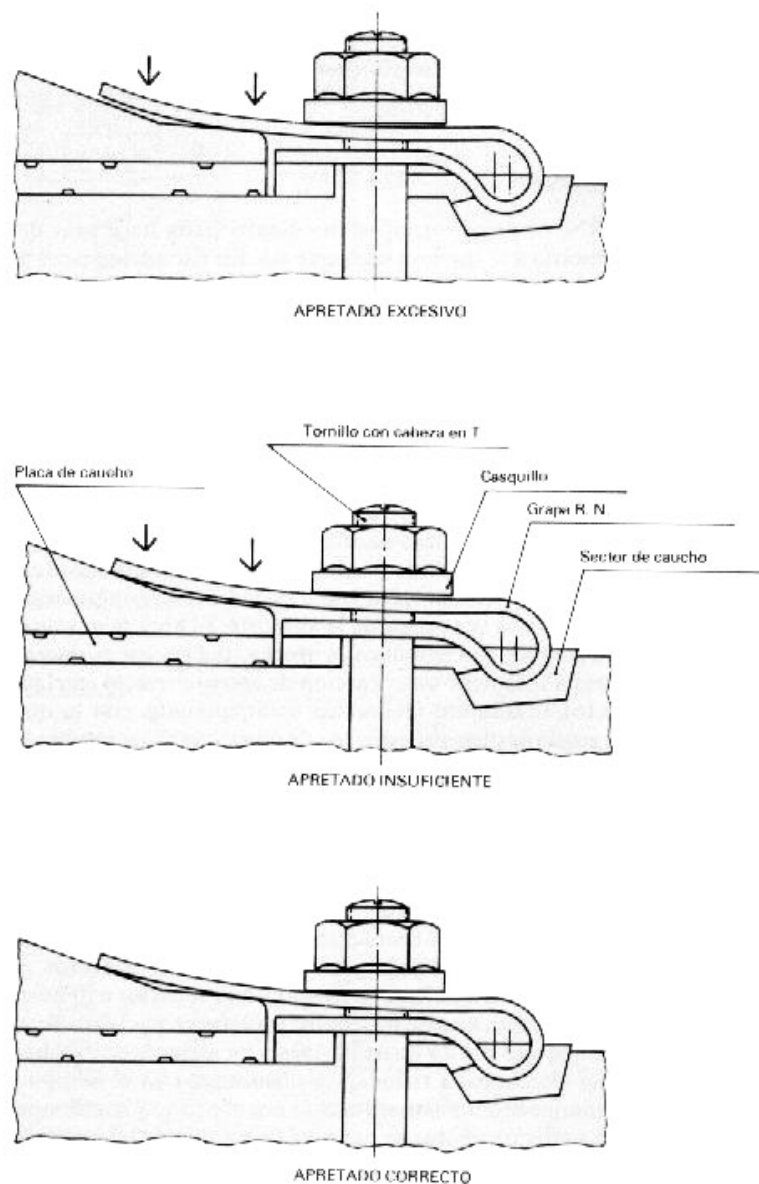


Figura 6. *Apretado adecuado de una sujeción RN.* [11]

Con esta sujeción obtenemos una respuesta elástica vertical en ambos sentidos. Cuando el esfuerzo vertical tiende a separar el carril de la traviesa, la grapa actúa elásticamente con una fuerza mayor cuanto más deformación se produzca. Por el contrario, cuando se producen esfuerzos que intentan hundir el carril, la placa de asiento se comprime y absorbe la deformación. Además, las acanaladuras evitan la expansión transversal de la placa.

Los esfuerzos transversales que se producen en la superestructura pueden llegar a deslizar el carril sobre la placa de asiento si se superan ciertos valores. La grapa se encarga de resistir dichos esfuerzos para que eso no ocurra. Los esfuerzos se transmiten a la hoja inferior de la grapa y se componen con la tensión del tornillo sobre el bucle para generar una resultante oblicua. Esta resultante se transmite al hormigón a través del sector de caucho, que gracias a sus propiedades hace de amortiguador.

Para conseguir un correcto aislamiento eléctrico en la sujeción RN son tres los elementos que entran en juego.

- La placa de caucho aísla el carril de la traviesa.
- El sector de caucho aísla la grapa de la traviesa.
- El casquillo de plástico aísla el tornillo de la grapa.

2.3.2- Sujeción P-2

La sujeción P-2 surgió en España como sustituta de la anteriormente descrita sujeción RN. El objetivo de este relevo era el de evitar los problemas que presenta la vía montada con el conjunto formado por la traviesa bloque RS y la sujeción RN, y más concretamente en lo referido al aislamiento eléctrico entre ambos hilos y la conservación del ancho de vía. Con esta solución se consigue resolver el problema del aislamiento hasta en condiciones climáticas adversas, y anula casi totalmente las

variaciones en el ancho que sufría la sujeción RN. A pesar de ello, la variación de este ancho causada por el giro de las cabezas de las traviesas debido a sus asientos y de la falta de rigidez de la riostra metálica que las une no se consigue evitar con esta nueva sujeción. [12]

La sujeción P-2 la componen dos tornillos de fijación a la traviesa que transmiten su presión al patín del carril a través de unas arandelas, unas láminas elásticas y unas piezas aislantes, interior y exterior.

En la Figura 7 se muestran los distintos elementos que componen la sujeción P-2. Los principales son:

- Los tornillos y arandelas de la sujeción.
- Las piezas de poliamida reforzada con fibra corta de vidrio que actúan como aislantes exterior e interior.
- La lámina metálica elástica.
- La placa de asiento del carril.

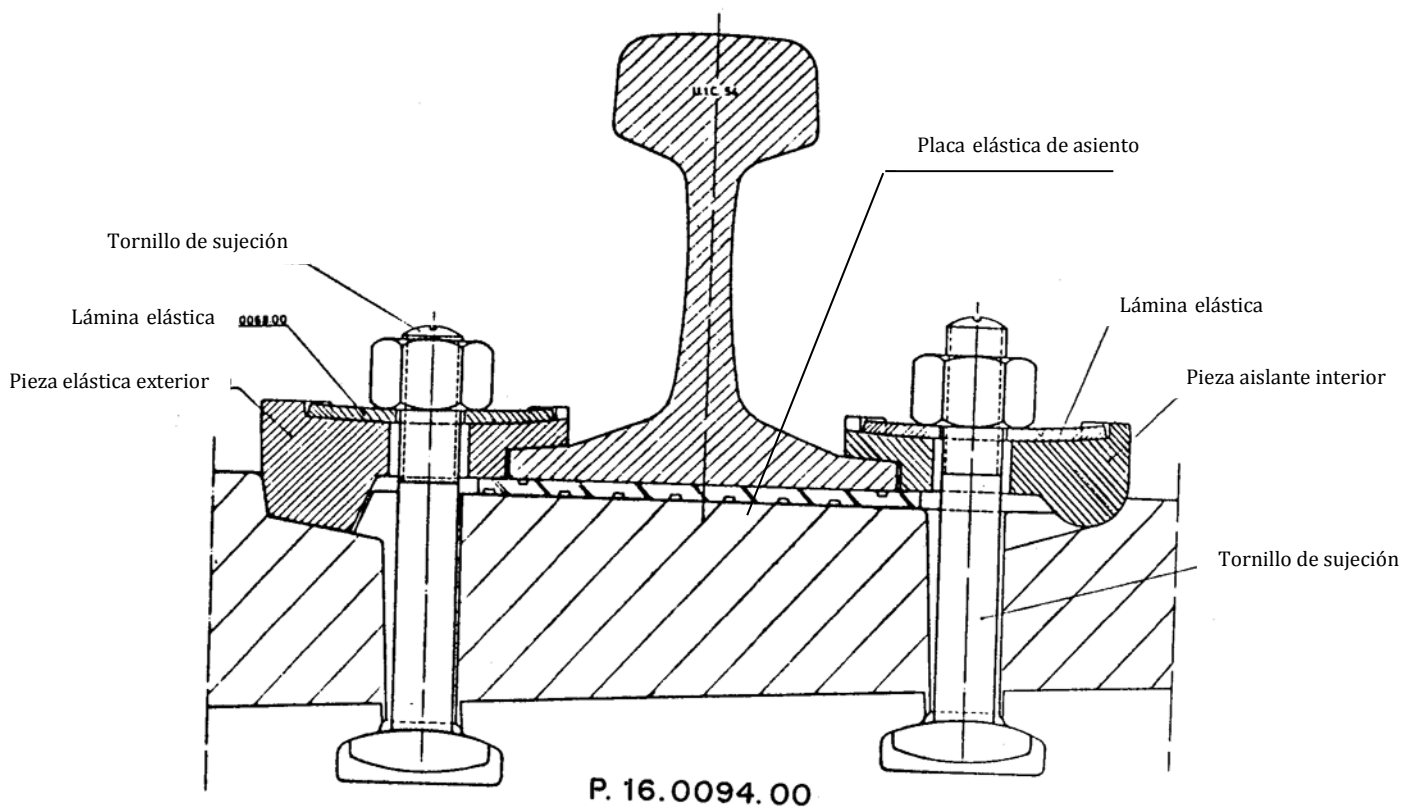


Figura 7. Sujeción P-2. [13]

Las grapas aislantes interiores y exteriores proporcionan un buen aislamiento eléctrico del carril. Además de ello, la grapa exterior se encarga de transmitir los esfuerzos transversales del patín del carril a los alojamientos de la traviesa. El diseño de esta por tanto es más robusto que el de la grapa interior, la cual se encarga de transmitir únicamente los esfuerzos verticales. El apriete vertical se obtiene por flexión de las láminas elásticas de acero. Estas láminas en inicio son planas, pero sometidas al esfuerzo vertical debido al apretado de los tornillos se deforman en un rango elástico hasta que entran en contacto con la superficie superior de las grapas, que es cóncava.

El diseño geométrico de la sujeción P-2 permite el poder realizar la sustitución de las sujeciones RN por estas sin necesidad de modificar las traviesas, ya que se puede acoplar sin problema a las cavidades existentes en las traviesas RS para el alojamiento de las sujeciones RN.

A continuación, se citan algunas de las propiedades ventajosas que posee la sujeción P-2 frente a la sujeción RN:

- Posee un tope para el apretado, con lo que se evita la medición del par necesario a aplicar. El estado de ajuste suficiente para fija el carril se logra cuando se aprieta hasta ese tope.
- El conjunto de la sujeción presenta un buen comportamiento a fatiga de los materiales a lo largo de su vida útil.
- Las deformaciones, tanto de la pieza aislante como de la lámina elástica, son pequeñas en comparación con el esfuerzo de apretado obtenido en el patín del carril.
- Mantiene el ancho de vía de mejor forma que la sujeción RN.
- La sujeción está formada por 18 piezas frente a las 24 que componen la sujeción RN.
- Debido al menor número de piezas, el montaje y conservación en vía resultan una tarea más sencilla.

A pesar de estas ventajas, la sujeción P-2 también presenta ciertos inconvenientes frente a la RN:

- Precio de fabricación más elevado.
- Recorrido elástico más corto.
- Más sensible frente a la acción del fuego.

En España se utiliza la sujeción P-2 para vías con velocidades máximas de hasta 160 km/h. Se pueden llegar a implementar en vías que lleguen a los 200 km/h cuando las condiciones geométricas de la vía y el estado de conservación de la misma sean los adecuados.

2.3.3- Sujeción J-2

La sujeción J-2 se trata de una versión mejorada de la sujeción P-2. En concreto, se trata de mejorar el comportamiento de la sujeción P-2 ante las sollicitaciones de fatiga, causadas por la acción de las cargas sobre la vía junto con la fuerza de apriete. De esta manera lo que se consigue es aumentar la vida útil del conjunto.

La variación que se introduce sobre la anterior sujeción P-2 es la interposición de escalones de apoyo sobre la cara superior de la pieza de plástico para evitar el contacto eventual entre la placa metálica y la pieza en cuestión. Con esta solución, la placa no transmitirá todos los esfuerzos verticales a la pieza de plástico. Igualmente, esta solución presenta una mejora de la resistencia a los esfuerzos laterales frente a la sujeción P-2.

Si nos fijamos en el esquema de la sujeción mostrado en la Figura 8 podemos observar que se asemeja mucho al de la sujeción P-2. La sujeción la componen 22 piezas por traviesa, entre las que cabe destacar algunas [14]:

- Tornillo y arandela de sujeción.
- Lámina elástica metálica. 5-6 mm espesor.

- Piezas aislantes J-2 fabricadas en poliamida reforzada con fibra corta de vidrio.
- Placa de asiento elástica bajo el carril.

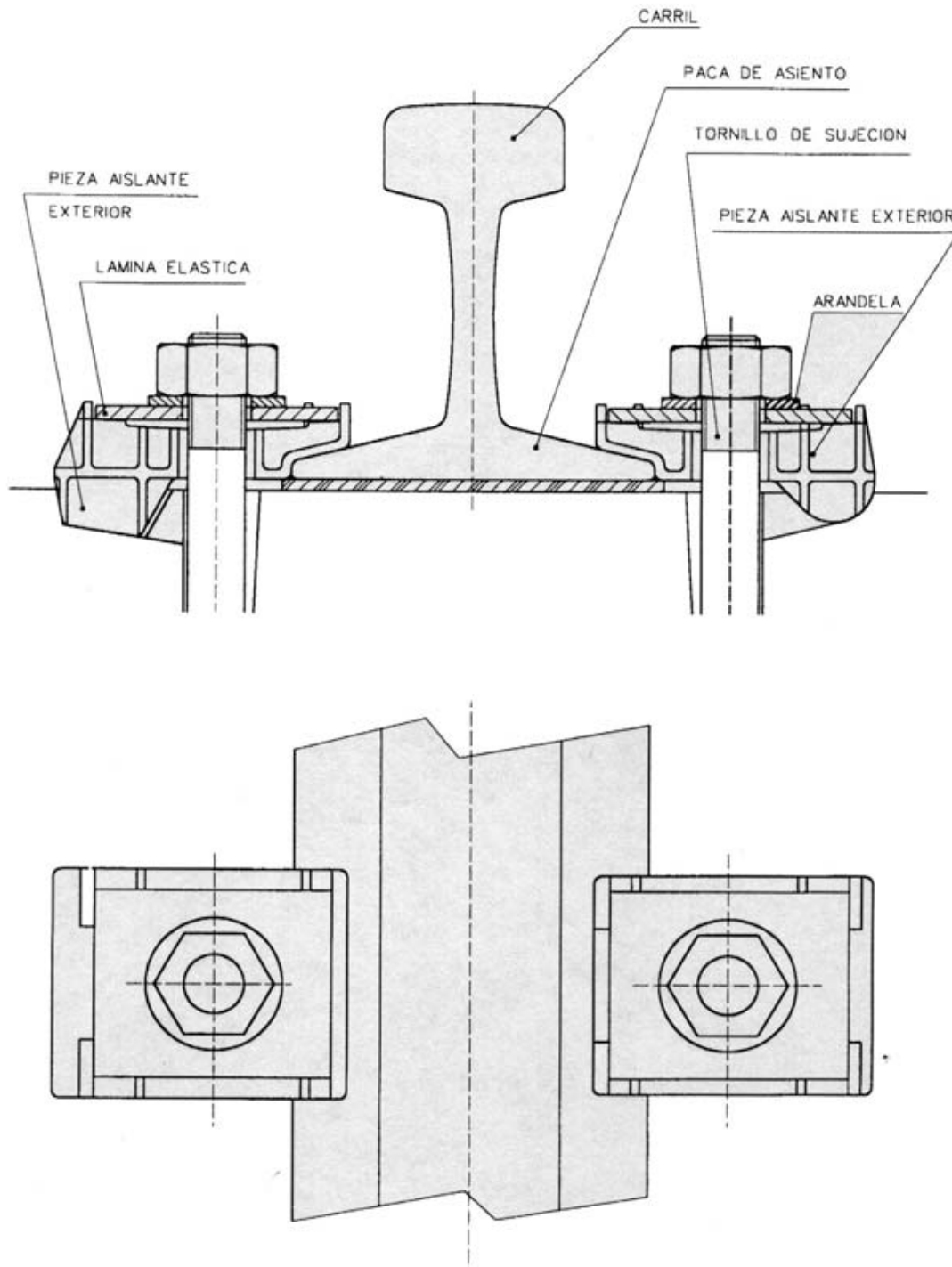


Figura 8. Sujeción J-2. [15]

El sistema general de esta sujeción del carril sobre la traviesa, en la que el carril se apoya sobre esta mediante una placa de asiento elástica, está conformado por dos piezas de plástico. Una de ellas corresponde al lado exterior del carril respecto de la vía y otra al lado interior. Ambas piezas se unen a la traviesa a través de sendos tirafondos con las arandelas y tuercas correspondientes. A su vez las tuercas aprietan a una placa metálica elástica contra su asiento. Esta placa se deforma para absorber el exceso de presión que se pueda producir por el par de apriete.

El elemento fundamental de la sujeción es la pieza aislante encargada de apretar el patín contra la traviesa, asegurar correctamente el ancho de vía y además es fundamental en la misión de aislar eléctricamente ambos hilos de la vía. Esta pieza aislante dispone en su interior tanto de nervios longitudinales, dispuestos ortogonales al plano de ataque del patín, como transversales, perpendiculares a los anteriores.

2.3.4- Sujeción NABLA

La sujeción NABLA es una variante francesa de la sujeción RN que surge con el objetivo de sustituir a la misma. A diferencia de la sujeción P-2, la sujeción NABLA no permite su acoplamiento a las traviesas RS dada su geometría. Está concebida para equipar nuevas traviesas bloque, utilizadas en Francia incluso en líneas de alta velocidad.

Esta sujeción está diseñada para solventar los problemas que presentaba la solución RN:

- Solventa el problema de la variación del ancho de vía.
- El aislamiento eléctrico entre ambos carriles es correcto.
- La unión elástica con respecto al carril es más sencilla, ya que la grapa es sustituida por una lámina doblemente elástica.
- Simplifica el apretado de la lámina.

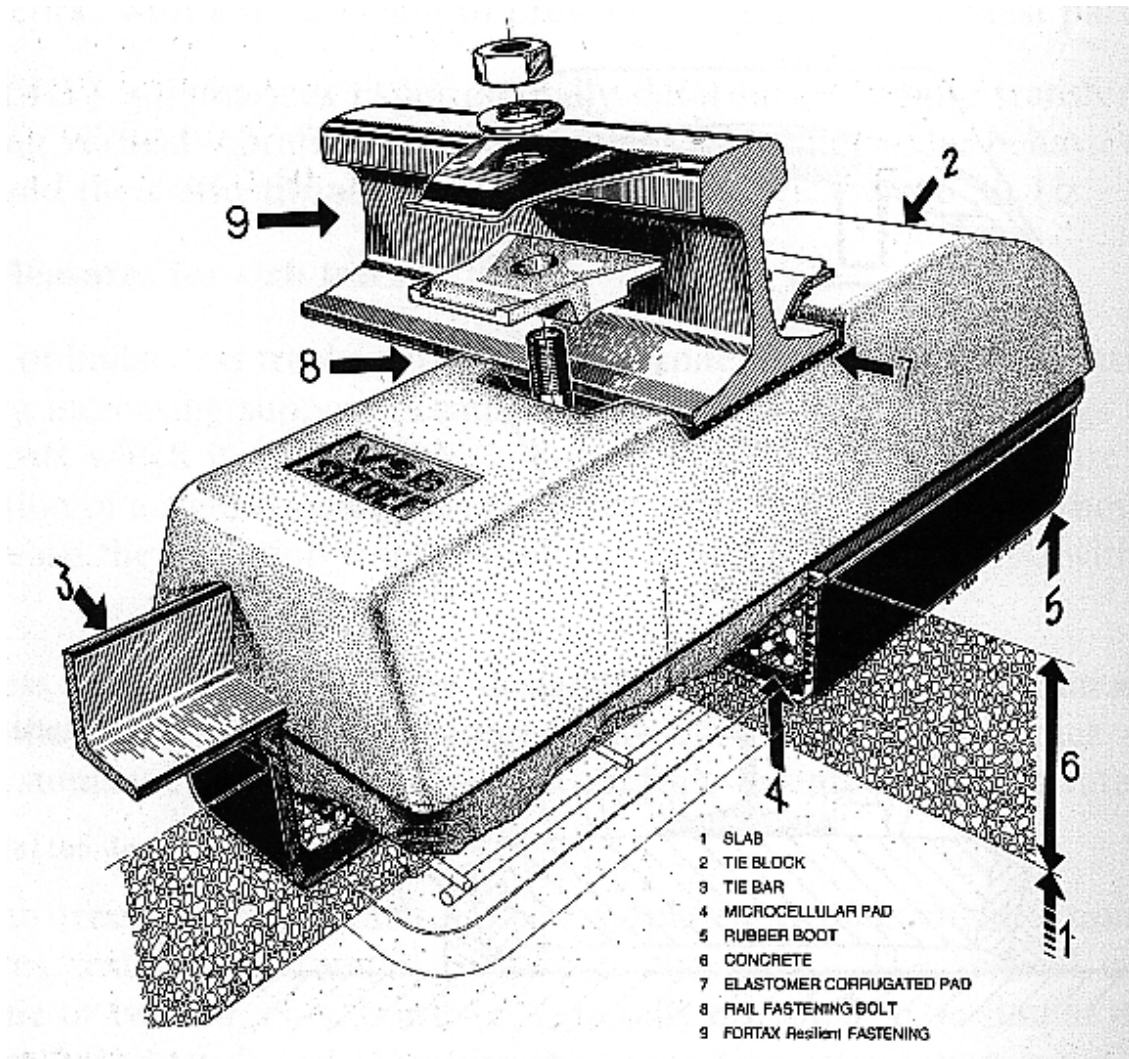


Figura 9. *Sujeción NABLA en traviesa bibloque.* [8]

Los componentes principales de la sujeción NABLA, bien sea traviesa de hormigón monobloque o bibloque, son los que se citan a continuación [16]:

- **Grapa elástica:** lámina de acero especial de forma trapecial, convexa hacia arriba y con el borde de su base menos curvado en la dirección del eje longitudinal del carril. La doble curvatura permite amortiguar tanto los movimientos verticales del carril como los horizontales junto con la pieza tope aislante, sobre la que ejerce presión mediante el anclaje de la sujeción y la arandela, y con la placa de asiento del carril.
- **Anclaje de fijación a la traviesa:** hay tres tipos de anclaje:
 - Tornillo de anclaje similar al de grapa utilizado en la sujeción RN.

- Tirafondo roscado en una espiga aislante protegida con una envoltura metálica embutida en el hormigón.
- Vástago roscado anclado a la traviesa igual que el tirafondo, pero finaliza en una rosca y va provisto de tuerca hexagonal.
- **Tope aislante:** Pieza de poliamida fundamental para la sujeción. Existe de diferentes formas. Algunas de sus funciones son las siguientes:
 - Aísla el carril de la sujeción.
 - Permite el montaje de distintos tipos de carril en la misma traviesa.
 - Dota de diferentes sobreanchos a las curvas de pequeño radio.
 - Posibilita el cambio de una instalación de vía ancha (1.668 mm) a otra de ancho internacional (1.435 mm) y viceversa utilizando tanto el mismo carril como la misma traviesa.
- **Placa de asiento:** plancha acanalada realizada de material elastomérico que se coloca entre el carril y la traviesa. La elasticidad del componente ha de ajustarse a la de la grapa y el tope para que las deformaciones del conjunto permitan mantener una presión del carril sobre la traviesa tal que impida su desplazamiento. Los modelos de las placas son varios, con diferentes espesores (4.5, 6.5 y 9 mm) y acanaladuras en función de la carga por eje esperada, la velocidad de diseño de la vía, el perfil escogido para el carril... Para poder satisfacer el correcto funcionamiento y amortiguación en vías de alta velocidad se utilizan espesores de 9 mm.

Los elementos que conforman la sujeción se colocan de tal manera que el carril queda completamente aislado tanto de la traviesa como de cualquier elemento metálico. Así se consigue un aislamiento eléctrico total del mismo.

En el momento de realizar el apretado definitivo existen dos opciones. La primera es manualmente con la ayuda de una llave hasta que la distancia entre el borde de la lámina elástica y la superficie del tope desaparezca, con alguna décima de milímetro de margen. La segunda opción consiste en realizar el apretado mediante una atornilladora mecánica de par limitado regulada entre 150 y 200 N*m.

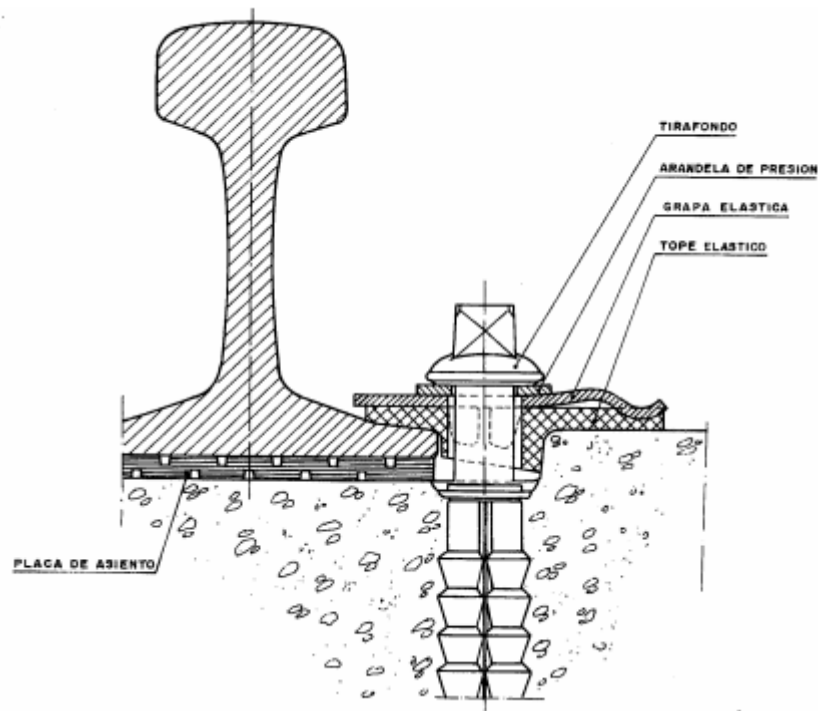


Figura 10. *Sujeción NABLA para traviesa de hormigón.* [16]

2.3.5- Sujeción PANDROL

El diseño de la sujeción PANDROL fue inventado por el ingeniero noruego Per Pande-Rolfsen [2]. Sin embargo, la explotación comercial de la sujeción es inglesa. Su principal característica es la ausencia de cualquier elemento roscado de apriete, lo cual facilita el mantenimiento del sistema. Por ello mismo, y a pesar de no ser totalmente de esa manera, se llega a considerar como una solución de instalar y olvidar o “fit & forget”.

La sujeción PANDROL admite traviesas tanto de hormigón como metálicas o de madera. En estas últimas la sujeción sería de tipo indirecto, mientras que en traviesas de hormigón y metálicas la sujeción es directa. Del total de las sujeciones PANDROL instaladas por el mundo aproximadamente dos tercios están instaladas en traviesas de hormigón, mientras que del tercio restante la mayoría corresponde a traviesas de madera y una pequeña parte a traviesas metálicas.

La sujeción PANDROL para traviesas de hormigón consta de los siguientes componentes [17]:

- Grapa elástica que trabaja a flexión y torsión combinadas. Fabricado de barra de acero de alta calidad aleado al siliciomanganeso y tratado térmicamente.
- Piezas de alojamiento de la grapa elástica embebidas en la traviesa en el proceso de su fabricación.
- Placa elástica de polietileno para asiento del carril. Posee unos entrantes laterales para encajar en las cabezas de las piezas de alojamiento de la grapa para evitar su desplazamiento.
- Pieza aislante de poliamida u otro material plástico. En alineaciones curvas de pequeño radio esta pieza se recubre de una lámina metálica.

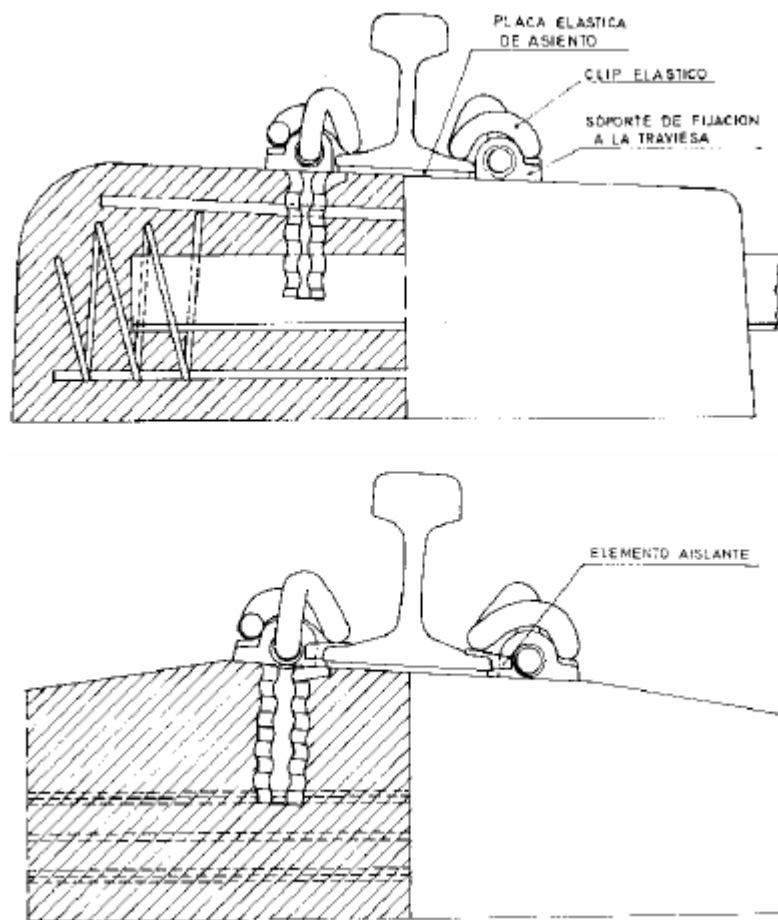


Figura 11. *Sujeción PANDROL en traviesa de hormigón.* [18]

La sujeción PANDROL para traviesas de madera la componen estos elementos:

- Grapa elástica. La misma que la empleada para traviesas de hormigón.

- Placa de asiento metálica. Existen varios modelos capaces de albergar de dos a cuatro grapas elástica, y el material en el que se fabrican puede ser acero laminado o fundición moldeada. En la parte central tiene un plano de inclinación 1/20 en el que asienta el carril, y en los costados laterales es donde están los alojamientos para los clips.
- Anclaje de la placa de asiento metálica a la traviesa. Se utilizan clavos elásticos o tirafondos. En función de la línea se colocan de dos a cuatro tirafondos por cabeza de traviesa.

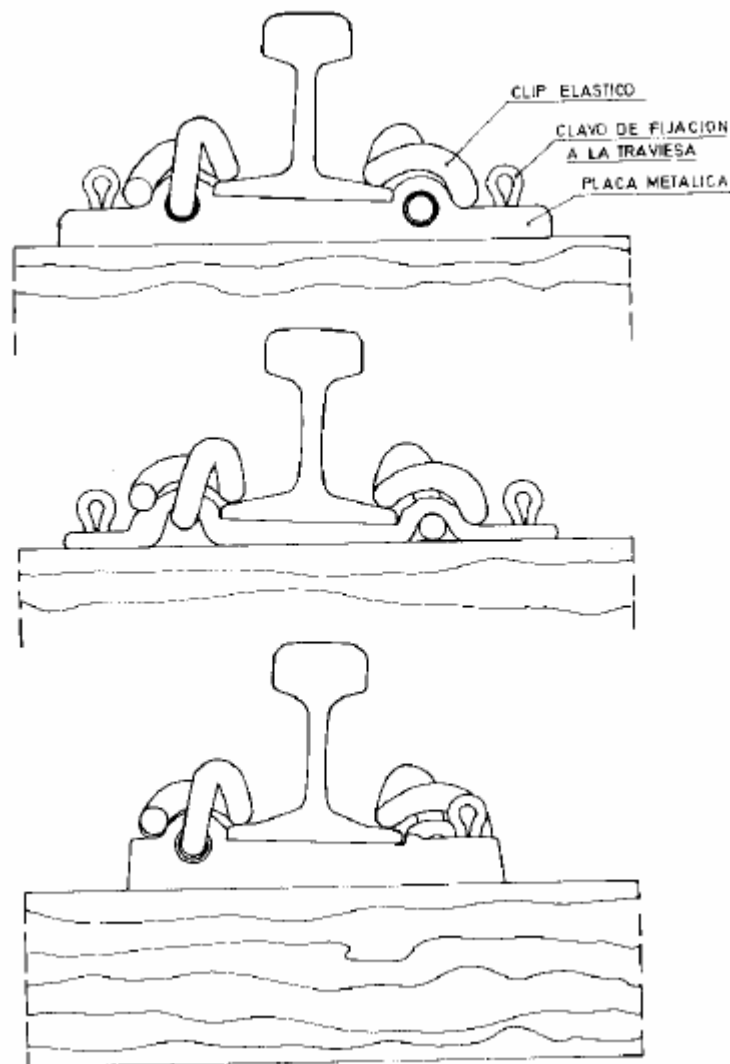


Figura 12. *Sujeción PANDROL en traviesa de madera.* [18]

La sujeción PANDROL para traviesas metálicas es la más simplificada de las tres opciones. Se compone exclusivamente de una grapa elástica fijada a la traviesa en

unos alojamientos realizados en esta durante su proceso de fabricación por corte y presión. Si las traviesas ya están dispuestas en vía y no disponen esos alojamientos la solución a tomar consiste en soldar una placa metálica para asiento del carril parecida a la usada en las traviesas de madera.

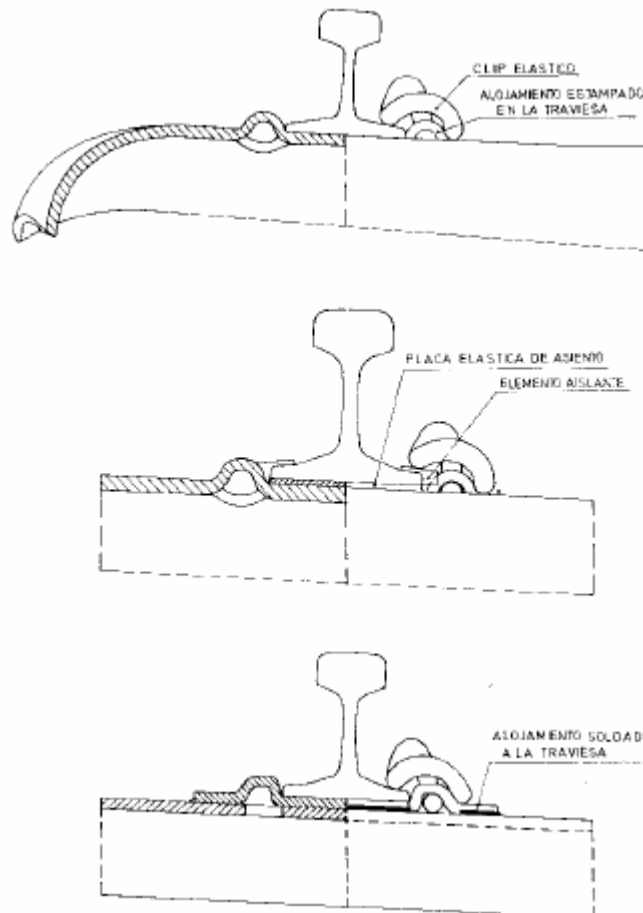


Figura 13. *Sujeción PANDROL en traviesa de acero.* [18]

La sujeción PANDROL ofrece un comportamiento óptimo frente a impedir el desplazamiento longitudinal del carril. Esto se logra gracias al efecto combinado de las grapas, que trabajan en sentido opuesto en ambos lados del patín debido a su colocación, y el apriete que cada grapa ejerce sobre el patín que se sitúa entre la mita y un tercio de la presión de contacto entre la propia grapa y su pieza de alojamiento, con lo que los esfuerzos longitudinales que transmite el carril no consiguen desplazar a la grapa de su posición.

Como se ha mencionado anteriormente, una de las grandes ventajas de este tipo de sujeción reside en su fácil montaje y desmontaje. Esto repercute tanto en los costes de mantenimiento como en los de instalación, ya que no se requiere de personal especializado para realizar las operaciones de montaje. Para el montaje y desmontaje de las grapas elásticas, la firma PANDROL dispone de dos herramientas específicas para facilitar la tarea:

- **Pan puller:** herramienta manual que se compone de un brazo metálico con una uña móvil y otra fija. Para instalar la grapa en su alojamiento se enfrenta su terminación con él, se inserta la uña móvil en la onda de la grapa y se ejerce presión con la herramienta como palanca y la cabeza de la pieza de alojamiento como punto de apoyo. Para el caso de extraer la grapa se utiliza la uña y se usa la traviesa como punto de apoyo para hacer palanca.
- **Pan driver:** máquina motorizada que se monta sobre la vía y puede desplazarse por ella. Requiere de un único operario para su funcionamiento. Puede retirar, simultáneamente, las cuatro grapas de la traviesa. También puede colocarlas una vez que sus extremos han sido enfrentados con los huecos del alojamiento.

Por último, cabe resaltar que debido a la robustez que presenta la sujeción, la vida útil de esta es casi la misma que la vida media del carril.

2.3.6- Sujeción HM (SKL 1)

La sujeción HM es una sujeción de origen alemán. La denominación se debe al nombre del ingeniero autor de su desarrollo, Hermann Maier. Existen varias versiones de este sistema de sujeción, entre las que sobresalen la directa SKL 1 y la indirecta SKL 12 con placa nervada de acero. [19]

En un inicio, la sujeción SKL 1 se fabrica para ser instalada en traviesas monobloque DW de hormigón tanto para carril de 54 kg como de 60 kg. Aun así, también se puede instalar en traviesas de madera o metálicas. En los casos de

traviesa de hormigón o de madera la sujeción se fija mediante un tirafondo, mientras que para traviesas metálicas la sujeción se fija a través de una tuerca roscada a un espárrago fijo a la traviesa.

La sujeción se compone de los siguientes elementos: [20]

- Grapa elástica. Pieza de acero de sección circular y forma de letra griega epsilon. Su misión es presionar el patín del carril contra la traviesa a través de la placa de asiento, trabajando a flexión y torsión simultáneamente.
- Tirafondo de acero galvanizado y cromatado.
- Espiga roscada de alojamiento del tirafondo. Forma troncocónica, fabricado en material plástico (normalmente polietileno) y con rosca en la cara exterior para que la adherencia con el hormigón de la traviesa sea mejor. La pieza se coloca en las traviesas en el proceso de fabricación de las mismas. La geometría permite colocar un muelle metálico roscado exteriormente si se necesita más adherencia con el hormigón. Va provisto de un fileteado interior para alojar el tirafondo.
- Placa acodada para guía del carril. Placa metálica con un codo en V en uno de sus extremos para poder colocarse en un alojamiento en la traviesa para así fijar su posición, y por tanto la del carril. La sujeción consta de dos placas, una a cada lado del carril que se interponen entre la traviesa y las grapas elásticas. Estas grapas presionan las placas. Las placas poseen un orificio para que pase el tirafondo de la sujeción a la traviesa y varios resaltes, de los cuales uno sirve de tope al apretado. El apretado se considerará apropiado cuando haya contacto entre el resalte en cuestión y la zona central de la grapa elástica.
- Plantilla aislante. Plancha de polietileno colocada entre la placa acodada y la traviesa, y de esta manera asegurar el aislamiento eléctrico entre los dos hilos.
- Placa de asiento del carril.

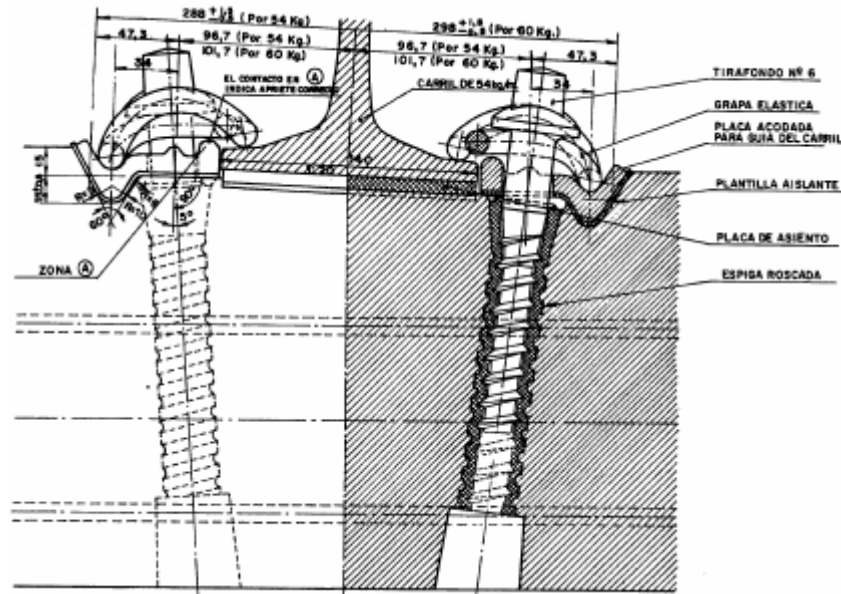


Figura 14. *Sujeción HM (SKL 1).* [20]

El funcionamiento de la sujeción se basa en los siguientes puntos:

- La forma y características de la grapa elástica que presiona el patín del carril contra la traviesa mediante la placa de asiento.
- La forma de la placa acodada guía del carril sobre la que la grapa elástica ejerce la presión.
- La instalación del tirafondo de presión en la espiga roscada.
- El aislamiento y las facilidades de apoyo que proporciona la placa de asiento y la plantilla aislante de la placa acodada.

Estas sujeciones se utilizan de dos por punto de sujeción. Si es de hormigón, se colocan placas de asiento elásticas de material sintético dotadas de rebordes laterales que las fijan sobre la traviesa para que no se desplacen durante el montaje.

2.4- Influencia de la placa de asiento en el deterioro de la vía

Prud'homme relacionó el parámetro de rigidez vertical de la vía con las sobrecargas dinámicas debidas a las masas no suspendidas a través de la siguiente expresión [21]:

$$\sigma(\Delta Q_{NS}) = 0.45 \frac{V}{100} B \sqrt{mK\varphi(\varepsilon)} \quad (2.1)$$

- $\sigma(\Delta Q_{NS})$: desviación típica de las sobrecargas dinámicas debidas a la masa no suspendida del material.
- V: velocidad del vehículo.
- B: variable relacionada con los defectos de la vía y el vehículo.
- m: masa no suspendida del vehículo.
- $\varphi(\varepsilon)$: amortiguamiento de la vía.
- K: rigidez vertical de la vía.

Con esto se deduce que resulta interesante conseguir un valor bajo de la rigidez de la vía, pero siempre limitado por un correcto funcionamiento de la vía.

También se ha demostrado que la potencia disipada en la vía por una rueda disminuye al aumentar la rigidez vertical de la vía.

El objetivo final es el de encontrar un valor óptimo para la rigidez vertical de la vía, lo cual se muestra en la siguiente Figura.

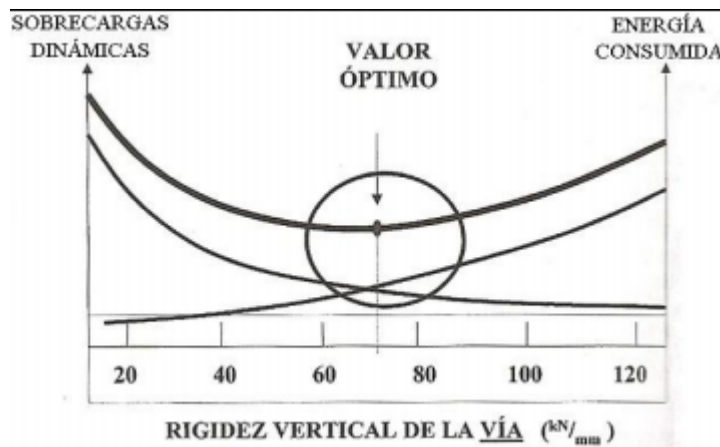


Figura 15. Rigidez óptima. [22]

Un valor bajo de la rigidez vertical de la vía causaría un hundimiento excesivo de la misma, con su correspondiente elevación en la tensión de los carriles. Por otra parte, si el valor de la rigidez es alto aumentan las sobrecargas verticales que ejerce el vehículo sobre la vía, con lo que esta sufriría un deterioro más rápido.

La rigidez vertical del soporte del carril K_s se puede calcular a partir de las rigideces individuales de sus componentes, supuesto el carril como un conjunto de sistemas elásticos dispuestos en serie. Si se conocen las rigideces del sistema balasto-plataforma (K_{bp}) y de la placa de asiento (K_{pla}), la rigidez del soporte del carril se puede calcular a través de la siguiente expresión:

$$K_s = \frac{K_{pla} * K_{bp}}{K_{pla} + K_{bp}} = \frac{K_{bp}}{1 + \frac{K_{bp}}{K_{pla}}} \quad (2.2)$$

Podemos ver en la expresión anterior que un aumento de la rigidez de la placa deriva en un aumento de la rigidez del soporte del carril.

Con el fin de comprobar si la rigidez de la placa de asiento tiene consecuencias sobre la velocidad de vibración del balasto, y por tanto sobre el deterioro de la vía, especialmente a altas velocidades, los ferrocarriles del ICE llevaron a cabo pruebas con placas de asiento de distintas rigideces verticales, llegando hasta placas de baja rigidez (20 a 60 kN/mm). En la Figura 51 se muestra los resultados de los ensayos en placas de 60 y 500 kN/mm.

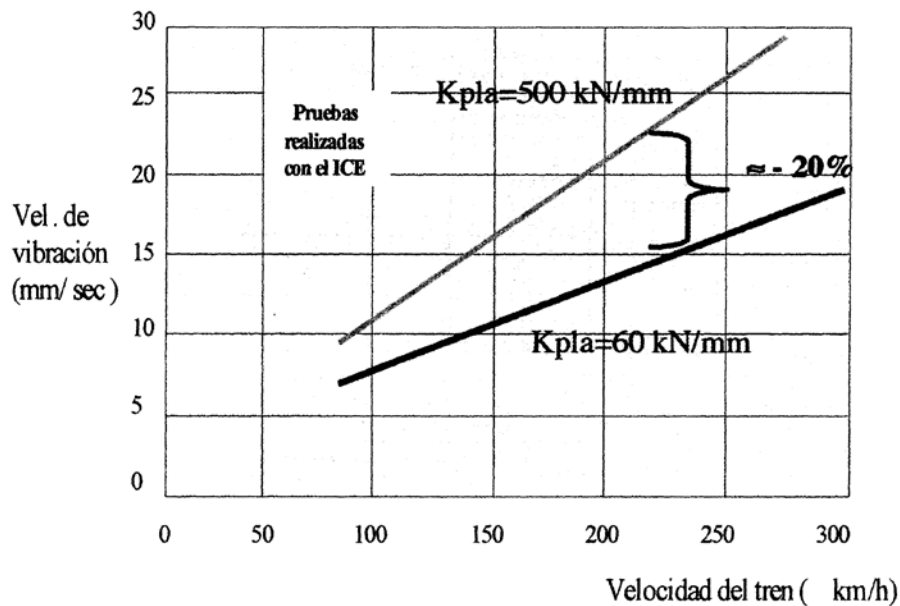


Figura 16. *Influencia de la rigidez de la placa de asiento en la vibración del balasto.*
[21]

En la gráfica se puede observar un decrecimiento apreciable entre la placa de 500 kN/mm y la de 60 kN/mm, que como se ve a una velocidad aproximada de 225 km/h la disminución es de aproximadamente un 20%.

Otros fenómenos nocivos, como la corrugación del raíl, también están fuertemente ligados a la rigidez, relacionándose la aparición de efectos perniciosos con la mayor rigidez de las placas de asiento, como se muestra en el artículo “Influence of the rail pad stiffness on the occurrence propensity of rail corrugation” [23]. Por ejemplo, en “Investigation of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system” [24] también se puede ver cómo reduciendo la rigidez de la placa de asiento desde los 90 a los 60 kN/mm, se produce una disminución de la amplitud de corrugación y la longitud de la misma de hasta un 55%.

Además, como se ha expuesto en trabajos como “An experimental Evaluation of the Attenuation Effect of Rail Pad on Flexural Behaviour of Railway Concrete Sleeper under Severe Impact Loads” [25] y “Atenuación frente a impacto en sistemas de sujeción ferroviaria de alta velocidad” [26], la rigidez de la placa de asiento también está relacionada con su capacidad para absorber energía y disipar los efectos nocivos de choques y vibraciones.

En conclusión, a lo expuesto anteriormente, la reducción de la rigidez vertical de la vía podría disminuir el deterioro de la geometría de la vía principalmente por dos motivos:

- Por ayudar conjuntamente a limitar las solicitaciones dinámicas verticales causadas en la vía por las masas no suspendidas de los vehículos.
- Por lograr disminuir la velocidad de vibración de las partículas de balasto con la velocidad de circulación, en especial si se trata de placas de asiento de gran elasticidad.
- Por la disminución de los efectos nocivos sobre el propio carril, como la corrugación producida al paso del material rodante.

3. El material

La placa metálica objeto de estudio está formada por hilo de acero inoxidable, tricotado, corrugado y prensado en un molde con el fin de obtener la forma geométrica que se desee. Esto resulta muy interesante, ya que basta con cambiar el molde para fabricar piezas para distintas aplicaciones. Estos cojines están conformados generalmente por acero inoxidable tanto en su referencia estándar como en fabricación particular. Si bien otros materiales como el cobre, aluminio, o incluso las conocidas como “Shape-memory alloys” (SMA) han sido empleadas en ciertas aplicaciones especiales.

El acero generalmente empleado es del tipo AISI-304, aunque si es necesario puede realizarse en AISI-316 para piezas que trabajan en ambientes muy corrosivos como industrias químicas o aeronáuticas. Algunas de sus características más importantes son su resistencia al agua, los rayos UV, aceites, hidrocarburos, etc. Sus características elásticas se mantienen a temperaturas extremas desde unos -70°C llegando hasta 300°C . Incluso se ha podido comprobar que tienen aplicaciones en rangos desde -150°C hasta 400°C con lo que resultan muy interesantes en variedad de aplicaciones en el ámbito ferroviario, industrial y aeronáutico. Su frecuencia propia oscila entre los 15 y los 20 Hz, y posee una amortiguación del 10 al 30%. Estas características hacen que se puedan aislar masas dinámicas con una frecuencia de excitación superior a los 30-35 Hz, por ejemplo. [27]

Para este estudio se han utilizado dos formas distintas del cojín metálico, uno con geometría prismática de 45 x 42 mm de base y 7 mm de altura y otro con geometría anular. Los cojines anulares a su vez se analizan en dos tamaños distintos, siendo cuatro de ellos de 74 mm de diámetro exterior y 51 mm de diámetro interior (placas A, B, C y D) y otros cuatro de 47,3 mm de diámetro exterior y 9,62 mm de diámetro interior (placas E, F, G y H), siendo el espesor de todas ellas de 7 mm. El hecho de utilizar dos tamaños distintos resulta interesante a la hora de analizar la influencia de las dimensiones y la forma.

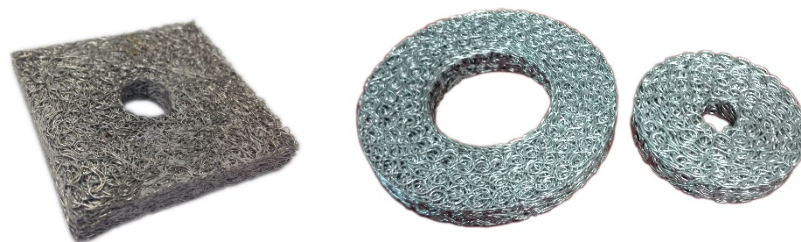


Figura 17. *Prototipos de ensayo: geometría prismática (izquierda), geometría anular de mayor tamaño (centro) y geometría anular de menor tamaño (derecha).*

[28]

Las placas metálicas ensayadas tienen densidades distintas entre ellas. Por lo tanto, además de la forma podremos observar cómo este parámetro de diseño influye en los resultados de las rigideces.

El comportamiento de la placa metálica se ha comparado con el de otros elastómeros, los cuales ya han sido utilizados en la construcción de vías de ferrocarril como placas de asiento en sistemas de sujeción elásticos. Esos materiales son los siguientes:

MUESTRA	Dureza HS-D	Aplicación	Espesor (mm)	Material
TPE-M	47	Alta Velocidad Española (i)	7	Termopolímero elastómero de poliéster (Hytrel)
TPE-S	45	Prototipo	9	Termopolímero elastómero de poliéster (Hytrel)
EPDM	21	Alta Velocidad en Arabia Saudí	7	Copolímero de etileno-propileno
TPU	30	Ferrocarriles mexicanos	9	Termopolímero elastómero de poliuretano
NFU	---	Prototipo	7,5	Neumático fuera de uso
EVA	46	Alta Velocidad Española (ii)	6	Etileno-vinil-acetato

En la Figura 18 se muestran las probetas prismáticas de las diferentes soluciones analizadas, las cuales se recortaron hasta una sección en planta de 45 x 42 mm para conseguir una geometría similar a la placa prismática metálica y poder realizar ensayos comparativos. Para la geometría anular se recortaron placas de EVA y de dos tipos distintos de EPDM hasta conseguir una sección en planta de 74 mm de diámetro exterior y 51 mm de diámetro interior para poder realizar ensayos comparativos con las placas metálicas anulares A, B, C y D.

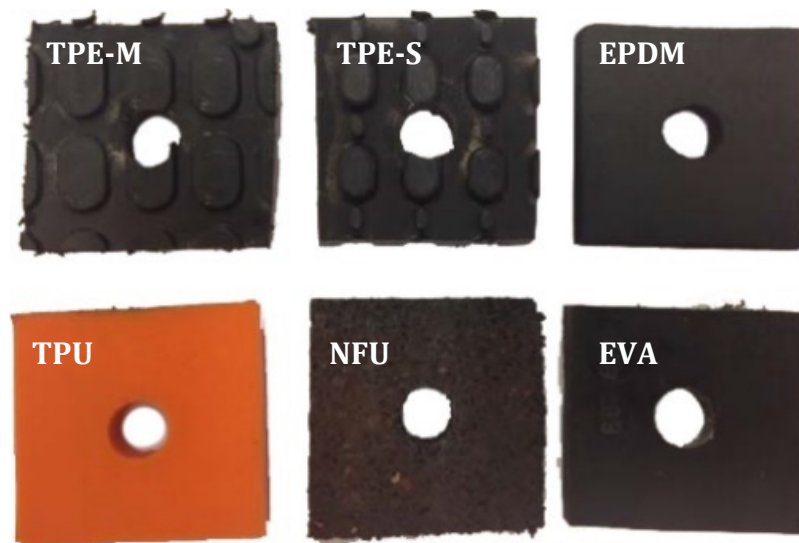


Figura 18. *Prototipo de ensayo de los diferentes elastómeros.*

4. Metodología experimental

4.1- Caracterización mecánica

Con el objetivo de evaluar el efecto del envejecimiento mecánico sufrido por los distintos modelos de placa de asiento relativos al ensayo se analizó la variación de las rigideces de las mismas, tanto en un régimen estático como en uno dinámico a varias frecuencias (5, 10, 20 Hz) antes y de un ensayo de fatiga.

Para evaluar las rigideces estáticas y dinámicas se escogió como modelo a seguir el indicado en la norma UNE-EN 13416-9 [29]. Hay que tener en cuenta que las placas a ensayar son muestras reducidas de las utilizadas en vía. Por tanto, las cargas se reducen para lograr obtener los mismos valores de tensión aplicados según la norma de referencia. Estos valores se muestran en la Tabla 1. Igualmente se ajustaron las velocidades de aplicación de carga para que la velocidad de deformación fuese la misma que en el ensayo normalizado, que es lo mismo que igualar la duración de los ensayos.

Para llevar a cabo los ensayos tanto de rigidez estática como dinámica, se utilizó una disposición similar a la mostrada en la Figura 54. En ella se aprecia cómo la medida del acortamiento de la placa a lo largo del ensayo se registra a través de un único comparador LVDT que se sitúa en el centro y atraviesa la placa de ensayo por su orificio central.

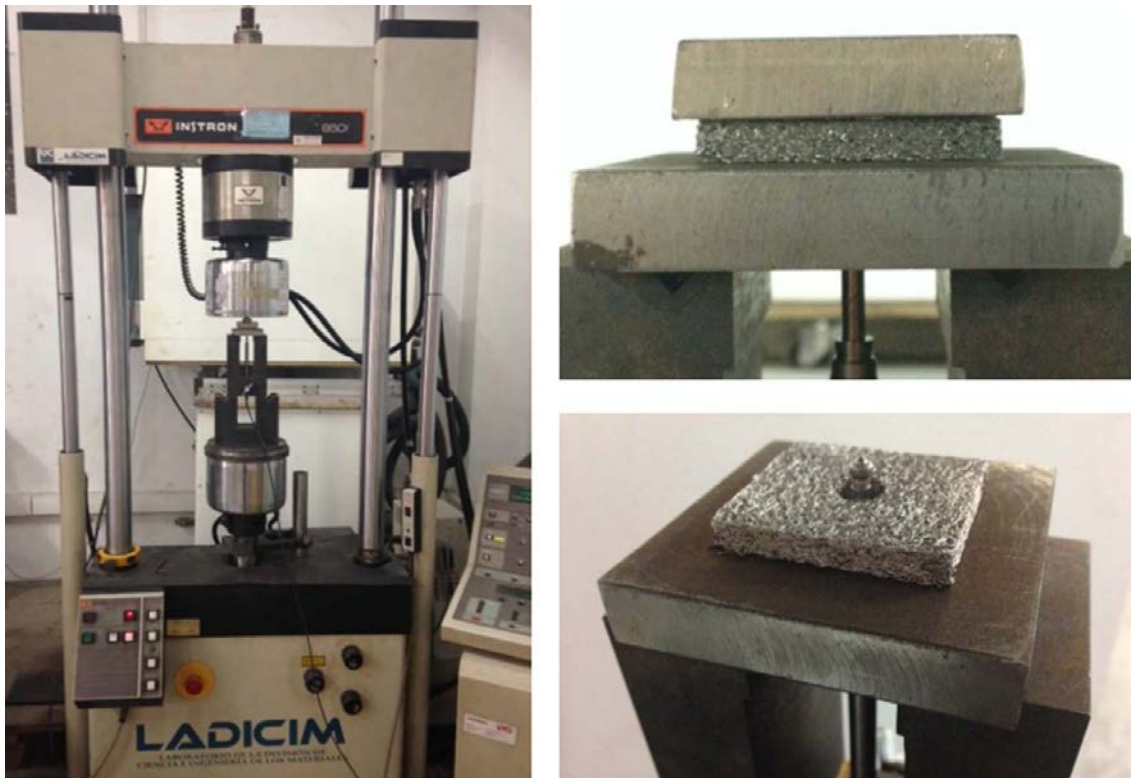


Figura 19. *Utillaje equivalente al utilizado en la realización de los ensayos. [30]*

Para los ensayos de rigidez estática se aplicó una serie de 3 ciclos de carga y descarga de compresión a una velocidad de carga V_e desde un valor mínimo establecido, F_{SP1} , hasta otro máximo, F_{SPmax} . Se registró el desplazamiento vertical que experimenta la placa (d) a través del comparador LVDT y se obtuvo la rigidez vertical estática (k_e) en la rama de carga durante el tercer ciclo a partir de la siguiente expresión entre los valores de fuerza F_{SP1} y $F_{SP2}=0.8* F_{SPmax}$.

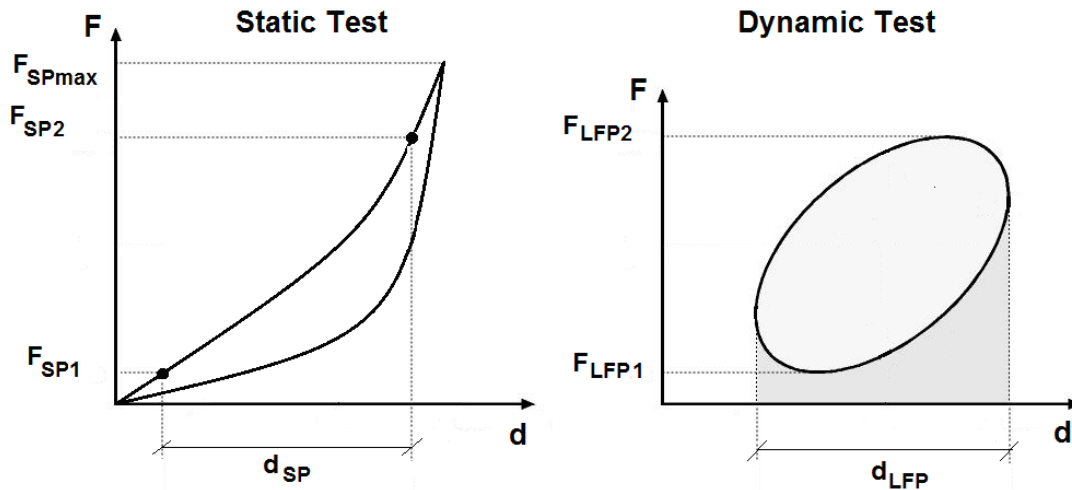
$$k_e = \frac{F_{sp2}-F_{sp1}}{dsp} = \frac{50}{dsp} \quad (5.1)$$

Siendo d_{sp} la diferencia de aplastamiento de la placa entre los valores de carga F_{SP1} y F_{SP2} .

Los ensayos de rigidez dinámica se realizaron con la misma disposición que para el ensayo estático. Se aplicaron 1000 ciclos de onda sinusoidal entre los valores F_{LFP1} y $F_{LFP2}=0.8* F_{LFPmax}$ a las frecuencias de 5, 10 y 20 Hz. La rigidez dinámica a baja frecuencia (k_d) se obtiene con la media en los últimos 10 ciclos de acuerdo a la expresión:

$$kd (5/10/20 \text{ Hz}) = \frac{F_{lfp2} - F_{lfp1}}{d_{lfp}} = \frac{50}{d_{lfp}} \quad (5.2)$$

Siendo d_{lfp} la diferencia de aplastamiento entre los valores de carga F_{LFP1} y F_{LFP2} .



Componente	S (mm ²)	F _{SP1} F _{LFP1} (kN)	F _{SPmax} F _{LFPmax} (kN)	F _{SP2} F _{LFP2} (kN)	V _e (kN/min)
Placa	23200	18	85	68	120
Cojín 1	1811	1,41	6,64	5,31	9,4
Cojín 2	3107,23	2,41	11,38	9,11	16,07
Cojín 3	1684,48	1,307	6,17	4,94	8,71

Tabla 1. Parámetros de ensayo de rigidez. Cojín 1: geometría prismática. Cojín 2: geometría anular $D = 71\text{mm}$ $d = 34 \text{ mm}$.

Cojín 3: geometría anular $D = 47,3\text{mm}$ $d = 9,62 \text{ mm}$.

Los ensayos de envejecimiento mecánico por fatiga se realizaron sobre los cojines prismáticos, aplicando 350000 ciclos de naturaleza sinusoidal a una frecuencia de 5 Hz entre los valores de carga F_{LFP1} y F_{LFPmax} usando la misma disposición de ensayo que en los ensayos de rigidez. Los valores de carga aplicada en este ensayo de fatiga son un 35% superiores a la componente vertical de la fuerza empleada en el ensayo de fatiga sobre traviesa inclinada [31]. Tras este ensayo, se repitieron los ensayos estáticos y dinámicos a baja frecuencia.

Por último, para comprobar el comportamiento tras una prueba de larga duración de fatiga se sometió al cojín metálico prismático a un ensayo de fatiga hasta completar $3 \cdot 10^6$ ciclos con una carga un 35% superior a la establecida en la norma de referencia y a 10 Hz.

4.2- Resistencia eléctrica

Uno de los puntos que hace que los materiales poliméricos sean adecuados para los sistemas de sujeción ferroviarios es su capacidad de aislar eléctricamente ambos carriles, manteniendo de esta manera las propiedades mecánicas adecuadas. En este caso se trata de un componente metálico, por lo que se considera adecuado realizar

una verificación de la resistencia eléctrica del sistema utilizando el cojín metálico. Para la determinación de la resistencia eléctrica del conjunto se siguen las prescripciones indicadas en la UNE-EN 13146-5:2003 [32]. Se montan dos cupones de carril sobre una traviesa completa, con los componentes de la sujeción nuevos según la configuración que se muestra en la Figura 20. Para medir la resistencia eléctrica se conectan ambos cupones de carril, aislados entre sí, por medio del circuito indicado en la propia Figura.

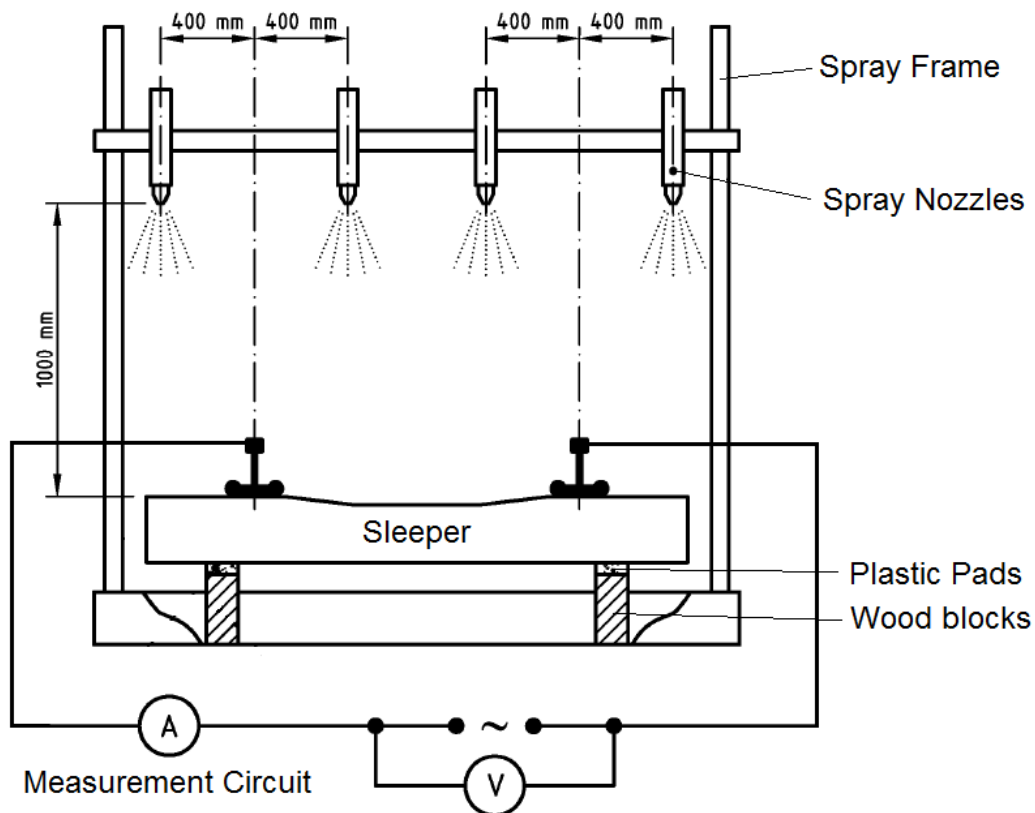


Figura 20. Configuración del ensayo de resistencia eléctrica.

La medida de la resistencia eléctrica se realiza bajo condiciones muy desfavorables, ya que se humedece el conjunto mediante un rociado de agua con los pulverizadores. Se mide la resistencia eléctrica entre los dos hilos de la traviesa ($R = V/I$), entre los que circula una corriente alterna, mientras se pulveriza agua durante dos minutos con una disposición geométrica (Fig. 20) y unas propiedades tanto de caudal como de temperatura determinadas. La medición de la resistencia eléctrica se prolonga 3 minutos después de la finalización del riego, con lo que el total son 5 minutos. Esta operación se repite tres veces sobre el mismo sistema, con un período de 24 horas entre cada ensayo para conseguir el secado exterior de los componentes.

Los parámetros de ensayo empleados son:

- Conductividad del agua utilizada (γ): 20-80 mS/m.
- T^a del agua: 10-20 °C y T^a ambiente: 15-30 °C.
- Caudal de agua por cada pulverizador (q): 8 l/min.
- Cono de rociado: de 100° a 125° y boquilla de diámetro 3.6 mm.
- Corriente alterna (AC): 30 V RMS y 50 Hz.

A partir de la resistencia mínima obtenida en cada uno de los tres ensayos (R_Y^i), se calcula la resistencia eléctrica corregida (R_C^i) a través de la expresión:

$$R_C^i = k_Y * R_Y^i \quad (4.1)$$

donde k_Y es el factor de corrección empleado por la conductividad del agua, $k_Y=0,03*\gamma$.

Con los tres valores de resistencia corregidos, por cada ensayo, se obtiene la resistencia eléctrica característica del sistema de sujeción ® como la media de todos ellos:

$$R_C = \frac{\sum_1^3 R_C^i}{3} \quad (4.2)$$

La especificación mínima para la resistencia eléctrica característica del sistema es de 5 kΩ, según se indica en la norma de referencia [34].

Para el ensayo se montaron 9 cojines para completar la superficie total ocupada por la placa de asiento. Con la previsión de que el contacto directo del conjunto traviesa-cojín metálico-carril pudiera ofrecer resultados no aptos según la especificación, se planteó una solución alternativa basada en colocar una placa de 1,5 mm de espesor de poliamida entre el carril y los cojines metálicos.



Figura 21. *Disposición de las placas metálicas en el ensayo de resistencia eléctrica.*

[35]

4.3- Corrosión

Al tratarse de un componente metálico se consideró conveniente realizar un ensayo de corrosión acelerada en cámara de niebla salina, ensayo adoptado para sujeciones de ferrocarril de acuerdo a la UNE-EN 13416-5 [36], siguiendo las pautas recogidas en la norma UNE-EN ISO 9227: “Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Ensayos de niebla salina.” Para realizar el ensayo se empleó una cámara de niebla salina WEISS TECHNIK SSC-1000 de 1000 litros de capacidad, siendo los parámetros de ensayo los siguientes:

- Agua desionizada con una conductividad de 0.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Cloruro sódico de calidad farmacéutica (99% de pureza).
- Concentración de la disolución: 5% en peso de NaCl.
- Temperatura del ensayo: 35 °C.
- Caudal recogido a lo largo del ensayo: 1.42 ml/hora.
- pH de la solución recogida al final del ensayo: 7,1.
- Duración del ensayo: 250 horas.

5. Resultados y análisis

5.1- Caracterización mecánica

5.1.1- Geometría prismática

En la Figura 22 se representa el último ciclo de ensayo de rigidez estática y dinámica sobre el cojín metálico. Los valores numéricos obtenidos se reflejan en la Tabla 2. Se puede ver que hay una gran diferencia entre ambos comportamientos, llegando a ser la rigidez dinámica media 2,6 veces superior a la estática.

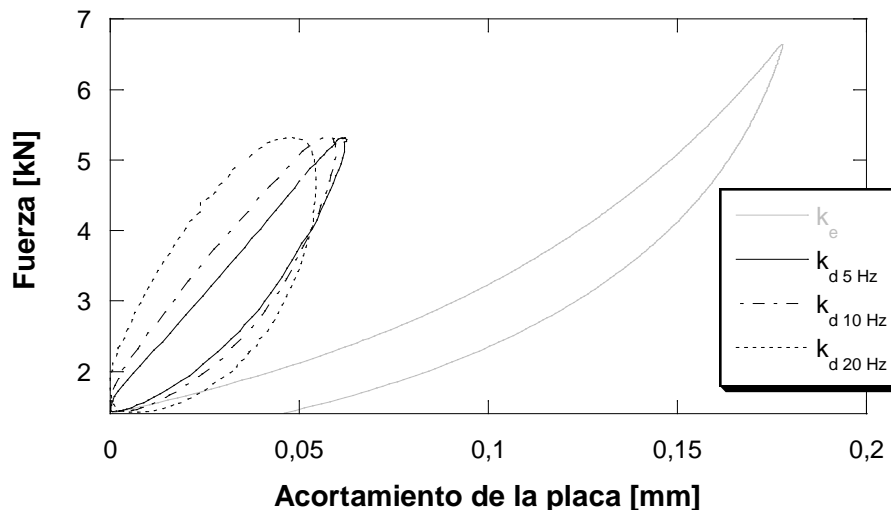


Figura 22. Comportamiento estático y dinámico del cojín metálico. [35]

La Figura 23 muestra una comparativa del último de los tres ciclos de carga del ensayo de rigidez estática sobre las diferentes soluciones de placas de asiento analizadas. Igualmente, en la Figura 24 se representa el comportamiento dinámico de una selección de las mismas. Los valores numéricos obtenidos se muestran en la Tabla 2. En ambas gráficas se puede observar la diferencia de comportamientos entre las distintas soluciones adoptadas como soluciones reales. Los valores obtenidos para la placa de asiento metálica se encuentran comprendidos en el intervalo de las soluciones, aunque muy próximos a la solución más rígida. La solución estática más flexible es la realizada en EPDM, seguida de cerca por el NFU.

La solución más rígida es la de EVA, unas 20 veces más rígida que la de EPDM. A continuación, la siguiente placa más rígida es la metálica. En cuanto al comportamiento dinámico, la tendencia de los resultados es la misma.

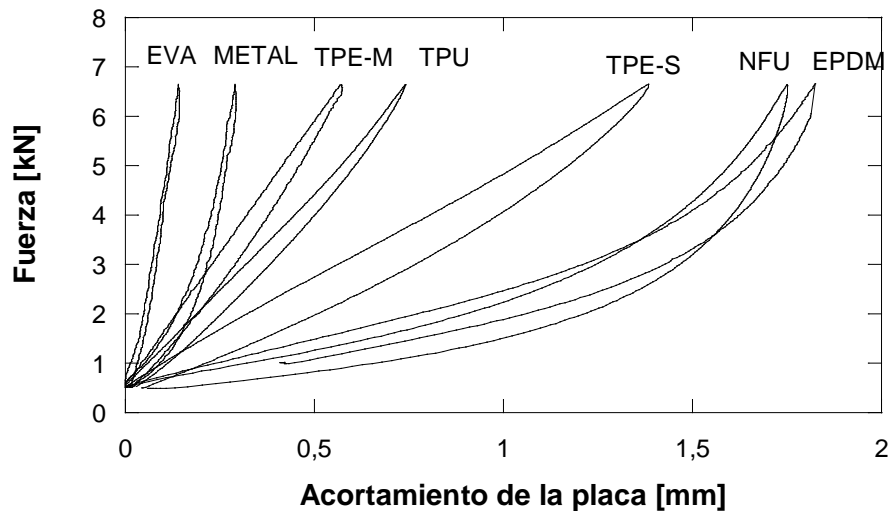


Figura 23. Comparativa del comportamiento estático para las diferentes soluciones adoptadas. [35]

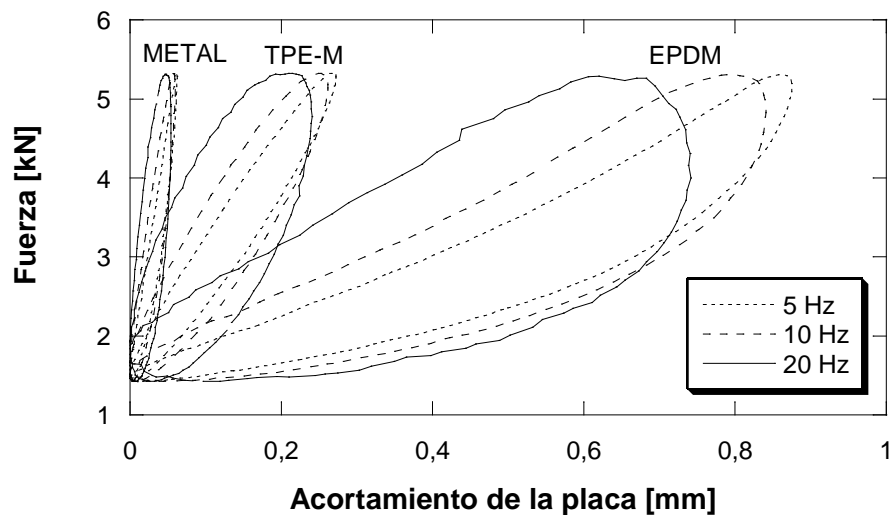


Figura 24. Comparativa de los comportamientos dinámicos de las placas de EPDM, TPE-M y metálica a diferentes frecuencias. [35]

En las Tablas 2 y 3 se muestran todos los valores de rigidez, estática y dinámica, para todas las soluciones estudiadas antes y después del ensayo de fatiga de $3,5 \cdot 10^5$ ciclos. Se vuelve a observar la gran diferencia entre el comportamiento estático y dinámico (k_d/k_e) de la placa metálica. Le sigue el NFU y la placa de EVA, mientras que el valor más bajo lo presenta la placa de TPE, seguida del TPU y EPDM.

PLACA	Rigidez estática, k_e (kN/mm)	Rigidez dinámica 5 Hz, k_d 5Hz (kN/mm)	Rigidez dinámica 10 Hz, k_d 10Hz (kN/mm)	Rigidez dinámica 20 Hz, k_d 20Hz (kN/mm)	Rigidez dinámica media, k_{dm} (kN/mm)	K_{dm}/k_e
METAL	324,7	806,4	838,9	925,9	857,1	2,64
EPDM	40,8	57,1	59,4	67,4	61,3	1,50
EVA	819,7	1533,7	1655,6	1824,8	1671,4	2,04
TPE-M	146,6	183,8	191,6	208,3	194,6	1,33
TPE-S	54,5	72,1	74,6	82,6	76,4	1,40
TPU	101,4	131,6	138,9	156,3	142,3	1,40
NFU	48,2	95,6	103,7	119,6	106,3	2,20

Tabla 2. Resultados previos al ensayo de fatiga de $3,5 \cdot 10^5$ ciclos.

PLACA	Rigidez estática, k'_e (kN/mm)	Rigidez dinámica 5 Hz, k'_d 5Hz (kN/mm)	Rigidez dinámica 10 Hz, k_d 10Hz (kN/mm)	Rigidez dinámica 20 Hz, k'_d 20Hz (kN/mm)	Rigidez dinámica media, k'_{dm} (kN/mm)	K'_{dm}/k'_e
METAL	362,3	811,7	831,9	896,1	846,6	2,34
EPDM	46,9	65,6	66,7	75,1	69,1	1,47
EVA	833,3	1529	1602,6	1851,1	1660,9	1,99
TPE-M	145,8	181,2	187,3	204,9	191,1	1,31
TPE-S	54,5	71,9	73,2	80,6	75,2	1,38
TPU	107,1	135,1	142	159,2	145,4	1,36
NFU	53,4	112,9	118,5	137	122,8	2,30

Tabla 3. Resultados posteriores al ensayo de fatiga de $3,5 \cdot 10^5$ ciclos.

En la Figura 25 se muestra la variación de las rigideces estáticas y dinámicas sufridas tras el período de fatiga de 350000 ciclos. Las placas que más acusan ese proceso de deterioro mecánico son a su vez las más flexibles, el EPDM y el NFU, con variaciones en ambas rigideces del 10 al 15%. Por otra parte, la placa más rígida que es la de EVA es la que menos daño ha acumulado (2% rigidización) e incluso las soluciones de TPE llegan a flexibilizar un 2%. El comportamiento del cojín metálico es un tanto peculiar, ya que en el comportamiento estático presenta una rigidización cercana al 10%, mientras que en el comportamiento dinámico no acusa el daño, e incluso llega a mostrar una ligera flexibilización.

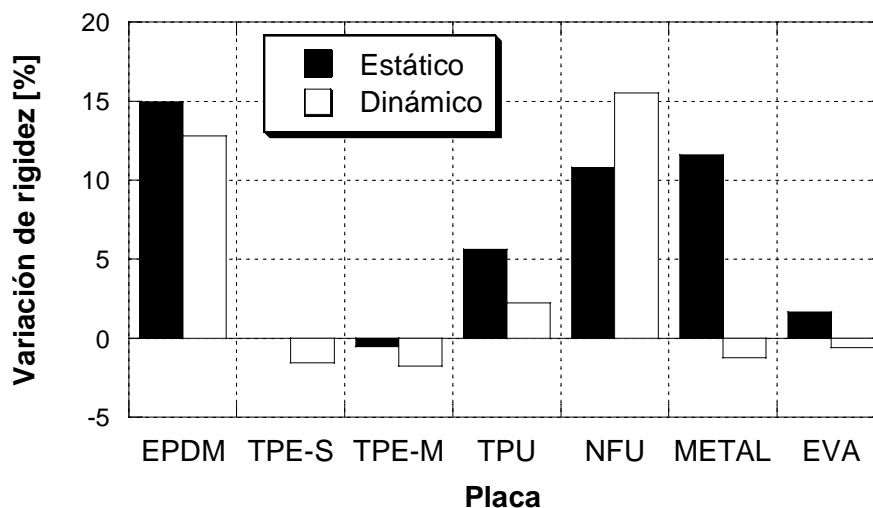


Figura 25. Variación en las rigideces estáticas y dinámicas tras el ensayo de fatiga de $3,5 \cdot 10^5$ ciclos. [35]

Analizando la evolución de la rigidez dinámica a lo largo del ensayo de fatiga a una frecuencia de 5 Hz (Figura 26) se observa que las soluciones más flexibles son las que muestran un peor comportamiento junto con el NFU, el cual presenta una variación del 25%. En el extremo opuesto encontramos la placa de EVA que apenas muestra variación, seguida de la placa de TPE-M con un comportamiento similar. Las placas de TPE-S, TPU y la metálica se agrupan en torno al 5% al final. Sin embargo, la placa metálica incrementa su rigidez ese 5 % en los primeros a 10^4 ciclos y luego se mantiene constante.

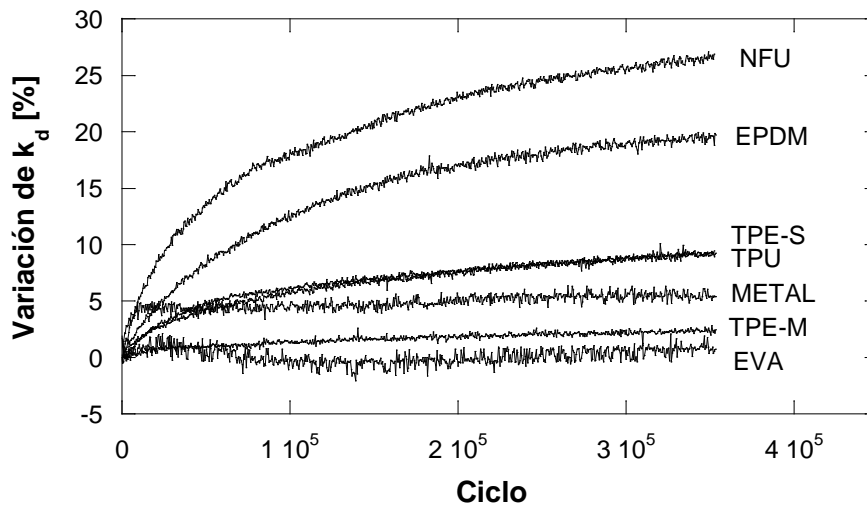


Figura 26. Variación de la rigidez dinámica durante el ensayo de fatiga a 5 Hz. [35]

Después del primer ensayo de fatiga se quiso estudiar la evolución del comportamiento en un ensayo de fatiga más prolongado, hasta completar los $3 \cdot 10^6$ ciclos establecidos por la normativa vigente [31]. Para ello, se mantuvo un nivel de carga anterior, un 35% superior al establecido en la normativa de referencia, y la frecuencia se incrementó a 10 Hz.

En la Figura 27 se representa la evolución de la rigidez dinámica a 10 Hz a lo largo de todo el ensayo de fatiga, al igual que su variación respecto al valor inicial medido para el cojín metálico. Se vuelve a ver un incremento rápido de la rigidez, de aproximadamente un 10%, en los primeros 10000 ciclos para luego mantenerse constante el resto del ensayo.

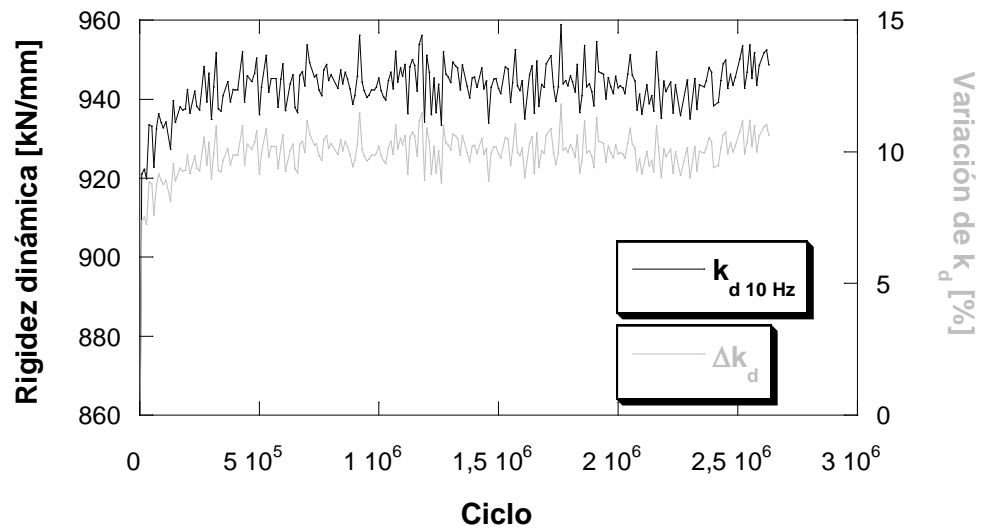


Figura 27. Evolución de la rigidez dinámica durante el ensayo de fatiga de $3 \cdot 10^6$ ciclos a 10 Hz para el cojín metálico. [35]

La Figura 28 representa la variación de la rigidez estática y dinámica a las diferentes frecuencias entre el valor inicial, el intermedio tras el primer ensayo de fatiga y el final tras los $3 \cdot 10^6$ ciclos. Sirve como comprobación al primer ensayo, ya que se observa un aumento de la rigidez estática de un 19% durante el segundo ensayo de fatiga y un 32% respecto al original. Las rigideces dinámicas tienden a disminuir.

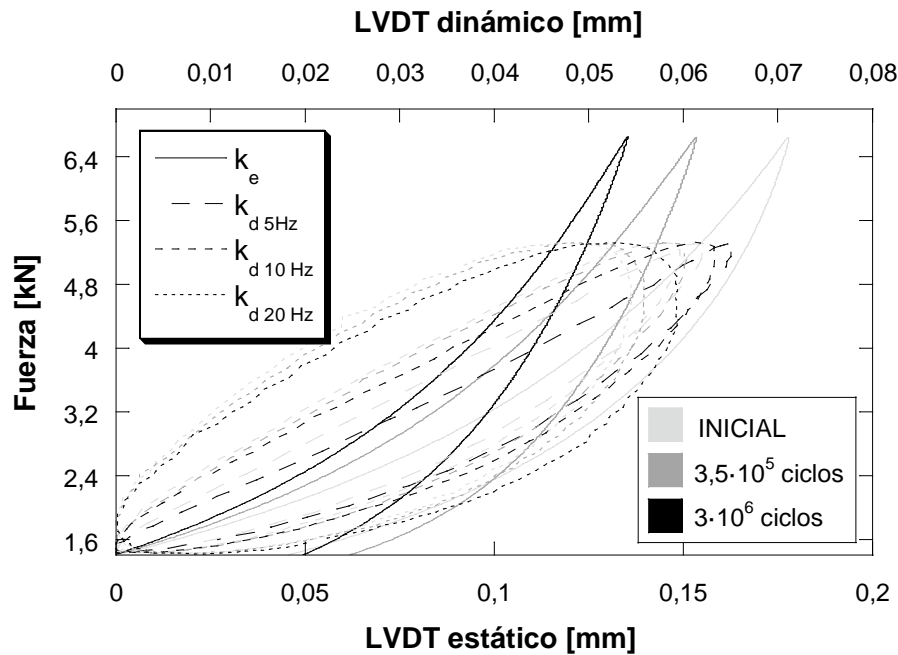


Figura 28. Evolución de las rigideces estática y dinámica tras los distintos ensayos de fatiga sobre el cojín metálico. [35]

5.1.2- Geometría anular

A continuación, se muestra en la Figura 29 el último ciclo de los ensayos de rigidez estática sobre los cojines metálicos A, B, C y D, siendo el B el más denso seguido del A, C y finalmente el D. Se puede observar la gran diferencia que existe en el comportamiento en una pieza de material y dimensiones iguales pero distinta densidad, siendo el valor de la rigidez estática de B mayor que el doble que el de D.

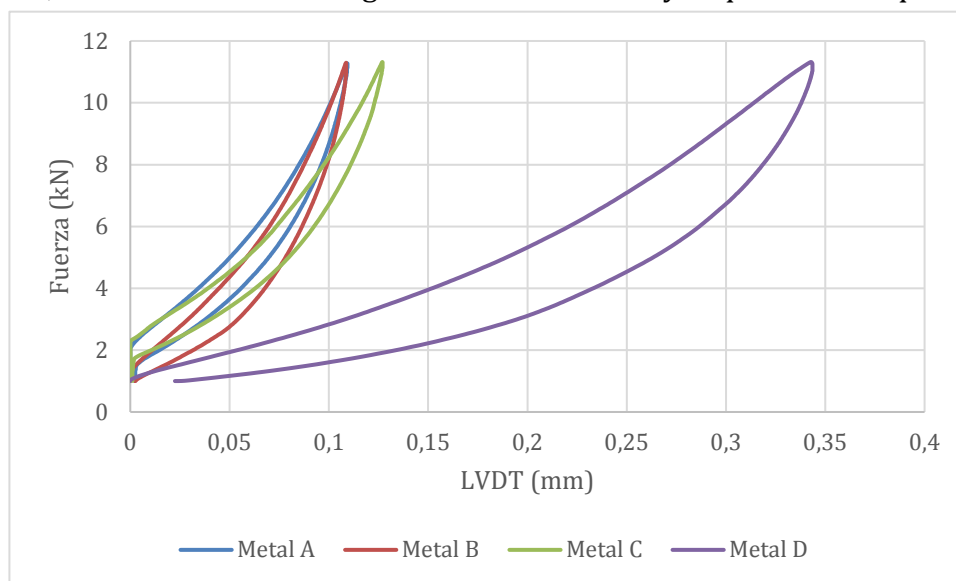


Figura 29. Comportamiento estático de los cojines metálicos A, B, C y D.

Igualmente, en la Figura 30 se representa la comparativa de la rigidez estática de la placa metálica más blanda (D) con los materiales elastoméricos (EVA y dos soluciones de EPDM distintas). Se puede observar que de las soluciones elastoméricas usadas en situaciones reales la única que tiene un comportamiento similar al cojín metálico es la solución más rígida, la de EVA. Las otras dos soluciones son claramente más flexibles que la solución metálica. En la Tabla 4 se muestran los valores numéricos de las rigideces estáticas de cada prototipo de placa estudiado.

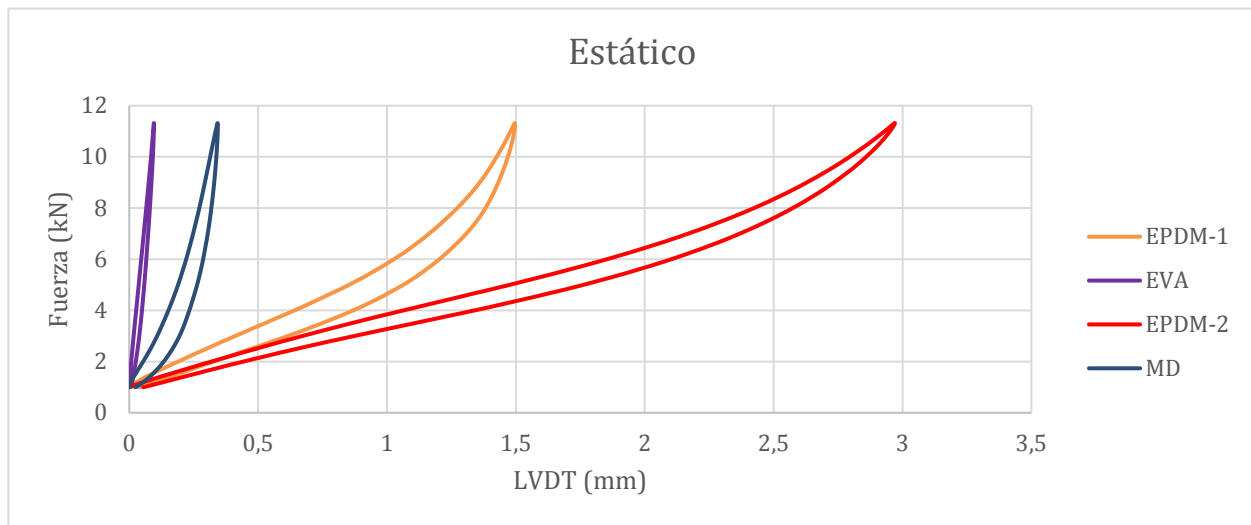


Figura 30. Comparativa del comportamiento estático para las diferentes soluciones ensayadas.

En las Figuras 31, 32 y 33 se muestra una comparación del comportamiento dinámico de las mismas placas de asiento anteriores a 5, 10 y 20 Hz respectivamente. Al igual que ocurre en el ensayo estático, el comportamiento dinámico del cojín metálico se asemeja al que presenta la placa de EVA, mientras que los otros dos materiales presentan comportamientos mucho más flexibles. Los valores numéricos de las rigideces dinámicas se muestran en la Tabla 4.

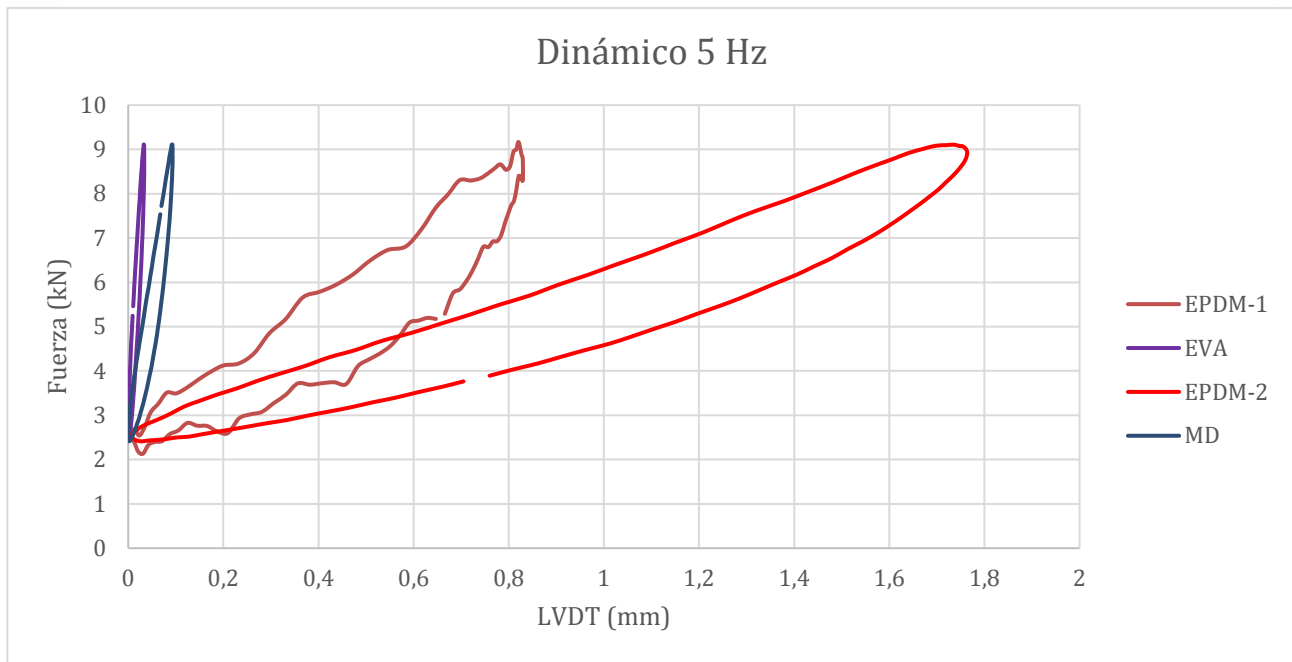


Figura 31. Comparativa de los comportamientos dinámicos de los diferentes tipos de placa de asiento a 5 Hz.

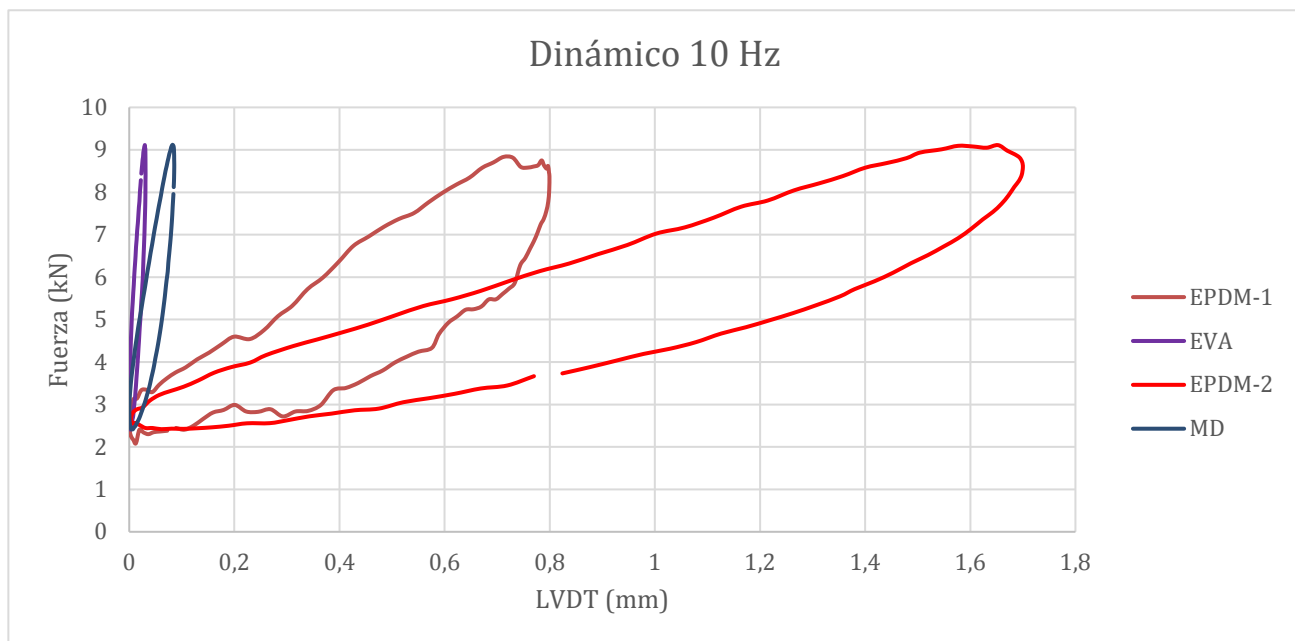


Figura 32. Comparativa de los comportamientos dinámicos de los diferentes tipos de placa de asiento a 10 Hz.

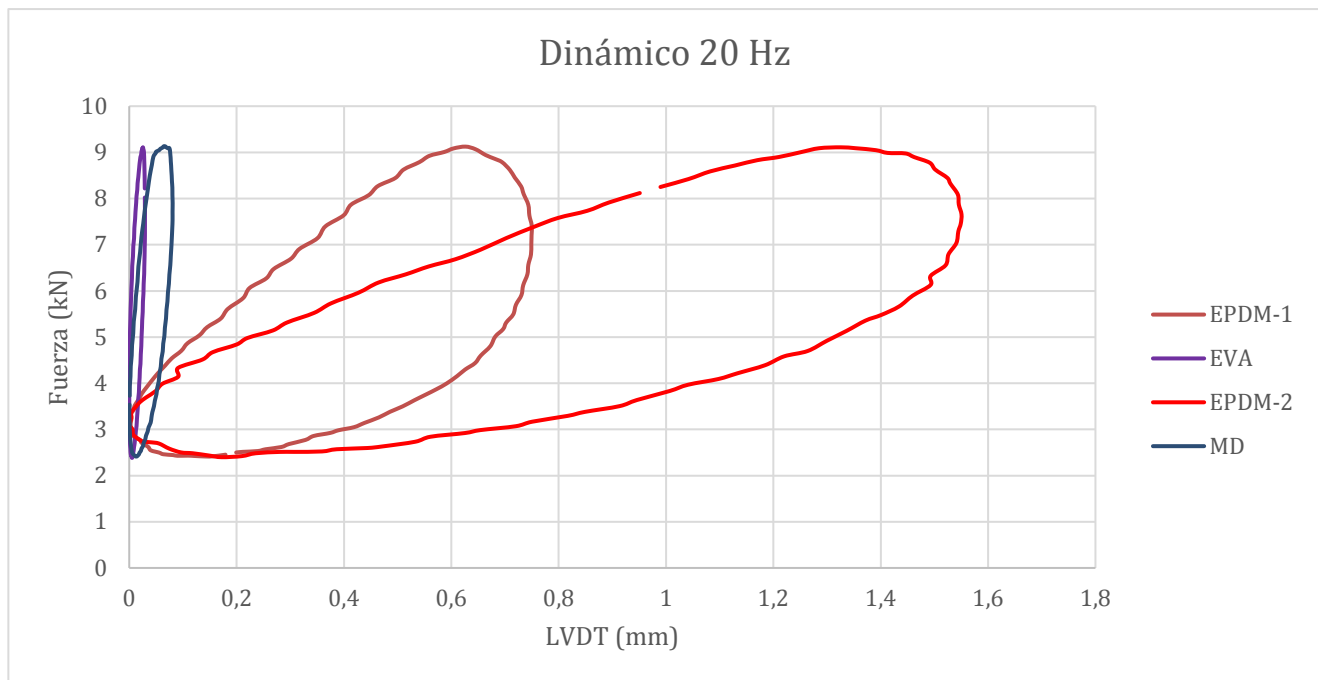


Figura 33. Comparativa de los comportamientos dinámicos de los diferentes tipos de placa de asiento a 20 Hz.

5.2- Influencia de la forma

En la Figura 34 se muestra una comparativa de los resultados en el ensayo estático entre las dos dimensiones de cojín metálico anular. Dentro de los cojines de dimensiones más reducidas, el denominado E es el de menor densidad de los cuatro, seguido por el F, G y finalmente el H, el más denso de todos. Aunque en la gráfica se ve que la tendencia que siguen las placas pequeñas es similar a las otras, en los datos mostrados en la Tabla 4 se pueden realizar mejores comparaciones con los datos de las rigideces estáticas y dinámicas obtenidos.

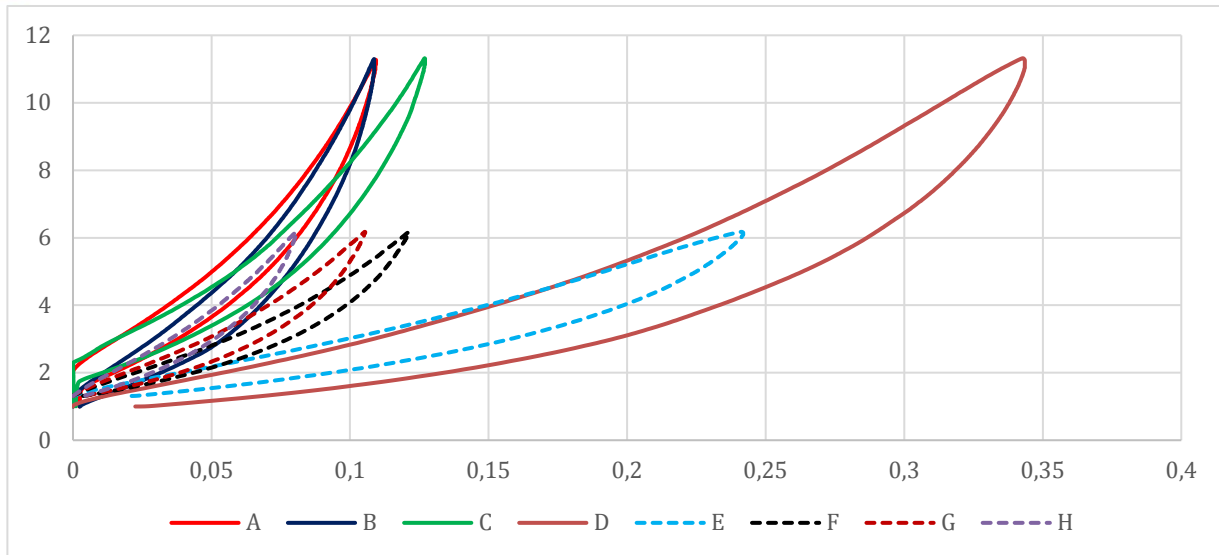


Figura 34. *Comparativa del comportamiento estático de los distintos cojines metálicos.*

En cuanto a la comparativa entre distintas geometrías, si el diámetro del alambre es el mismo y la densidad de la placa es similar se obtiene un valor de la rigidez superior en la geometría anular con respecto a la geometría prismática.

Igualmente, si estudiamos la relación entre la densidad de los prototipos y las rigideces estáticas y dinámicas [28] se puede observar que existe una dependencia entre ambas. En la Figura 35 se muestra esta relación, donde se puede observar que se puede establecer sin mucha desviación una relación lineal entre la densidad de la placa y su rigidez.

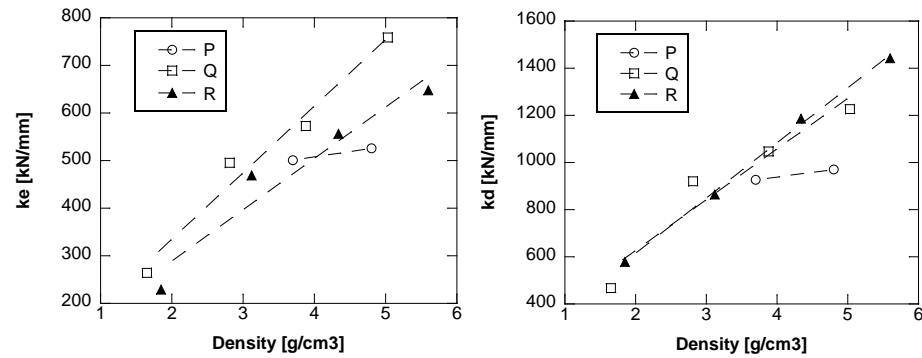


Figura 35. Relación entre la densidad y las rigideces estática y dinámica para el caso de un diámetro del alambre de 0.5 mm. [28] P: placa prismática. Q: placa anular grande. R: placa anular pequeña.

PLACA	Rigidez estática k_e (kN/mm)	Rigidez dinámica 5 Hz, $k_{d\ 5Hz}$ (kN/mm)	Rigidez dinámica 10 Hz, $k_{d\ 10Hz}$ (kN/mm)	Rigidez dinámica 20 Hz, $k_{d\ 20Hz}$ (kN/mm)	Rigidez dinámica media k_{dm} (kN/mm)	K_{dm}/k_e
EVA	767,8	1482	1607	1705	1598	2,08
EPDM-1	45,7	60	63	67	63,33	1,38
EPDM-2	22,8	28	29	32	29,67	1,3
METAL A	556,2	1167	1189	1205	1187	2,13
METAL B	645,7	1453	1415	1461	1443	2,23
METAL C	469,3	821	848	870	846,33	1,8
METAL D	228,8	535	583	618	578,67	2,53
METAL E	264,14	401	450	552	467,67	1,77
METAL F	495,27	870	907	987	921,33	1,86
METAL G	573,02	980	1032	1129	1047	1,83
METAL H	759,14	1187	1218	1276	1227	1,61

Tabla 4. Resumen de resultados de los ensayos de rigidez.

5.3- Caracterización eléctrica

Se realizó una medida de la conductividad del agua utilizada (γ), y se obtuvo un valor de 36.5 mS/m, por lo que el factor de corrección λ toma un valor de 1.095.

La evolución de los valores medidos de intensidad de corriente y de resistencia eléctrica, a lo largo del tiempo, correspondientes a los ensayos realizados sobre la configuración montada con los cojines metálicos sin aislante se muestran en la Figura 36.

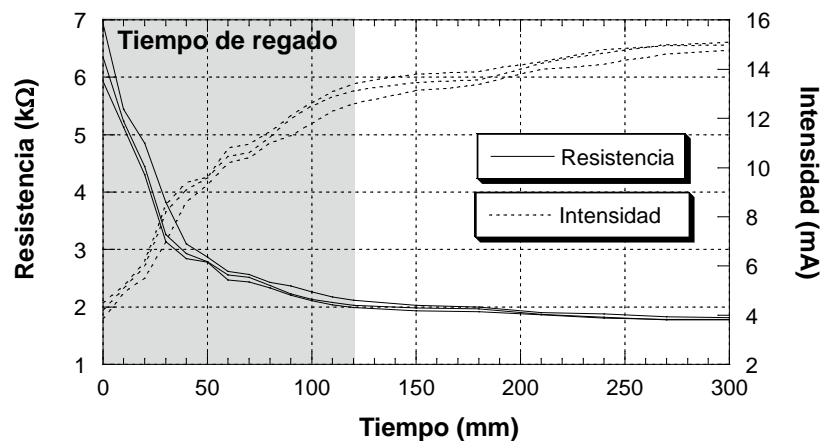


Figura 36. Comportamiento eléctrico de la sujeción con cojines metálicos sin aislante. [35]

Se puede observar que prácticamente desde el comienzo del ensayo la resistencia, sin corregir, disminuye de los 5 kΩ permitidos para los tres ensayos realizados. Cuando termina el regado de la traviesa se observa que la velocidad de disminución de la resistencia eléctrica no es tan brusca, pero sigue disminuyendo. Con lo cual, se concluye que esta solución no cumple con lo establecido en la norma UNE-EN 13146-5 [32].

El ensayo se repitió sobre la misma traviesa, con los mismos elementos de sujeción pero introduciendo una placa de Poliamida 6 de 1,5 mm de espesor entre las placas metálicas y la base del carril. En la Figura 37 se muestra una comparativa entre ambas soluciones, con y sin el elemento aislante. La Figura se muestra en escala logarítmica, dado que los valores de resistencia medidos antes del regado son muy elevados. La solución con la lámina aislante permanece en todo momento por

encima del valor límite, observándose una pequeña recuperación al finalizar el regado.

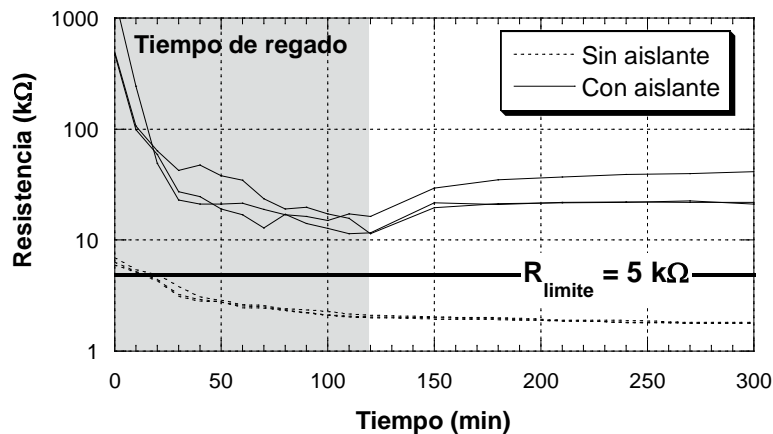


Figura 37. Comparativa del comportamiento eléctrico de la sujeción con placas metálicas con y sin lámina aislante. [35]

En la Tabla 5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo eléctrico, donde se comprueba que la introducción de la lámina aislante permite superar la especificación límite establecida sin problema.

ENSAYO	Sin placa aislante			Con placa aislante		
	Nº1	Nº2	Nº3	Nº1	Nº2	Nº3
R_{min} (kΩ)	2,11	2,03	1,99	16,4	11,6	11,4
R_C^i (kΩ)	2,31	2,22	2,18	17,9	12,7	12,5
R_C (kΩ)	2,24			14,4		

Tabla 5. Resumen de resultados obtenidos en los ensayos eléctricos. [35]

5.4- Comportamiento frente a condiciones adversas

Tras el ensayo de 250 horas en cámara de nieblas salinas no se apreció el inicio de corrosión roja en ninguna de las cuatro muestras ensayadas. En la fotografía de la Figura 38 se muestra una de las placas ensayadas tras un lavado en agua para eliminar los restos de sal acumulada durante el ensayo. Aún con el lavado, se pueden apreciar en la fotografía pequeñas acumulaciones de sal entre los alambres del cojín.

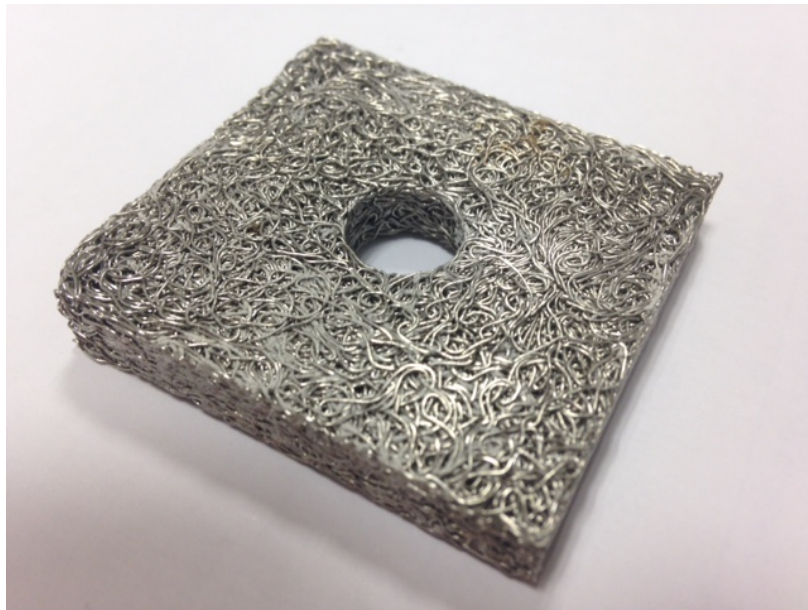


Figura 38. *Aspecto del cojín metálico tras las 250 horas en cámara de nieblas salinas. [35]*

6. Conclusiones

Analizando los resultados obtenidos en los ensayos realizados, las conclusiones a las que se llegan son las siguientes:

- El comportamiento del cojín de acero es rígido con respecto a las soluciones de materiales elastoméricos, siendo la solución fabricada con EVA la única que presenta valores similares.
- Presenta una diferencia elevada entre el comportamiento estático y el dinámico (k_d/k_e). El valor más elevado de todas las placas analizadas es de 2,64.
- Tras el ensayo de fatiga de $3,5 \cdot 10^5$ ciclos las placas que mayor rigidización acusan son las elásticas, es decir la de EPDM y la de NFU, y las que menos las de TPE y EVA, siendo las de TPU las que quedan en una situación intermedia. La placa metálica muestra un comportamiento diferente al resto, ya que en el ensayo estático rigidizó en valores próximos a los de EPDM o NFU mientras que en el dinámico llega incluso a flexibilizar.

- En el seguimiento de la rigidez dinámica en el ensayo de fatiga se puede comprobar que la placa metálica sufre un pequeño crecimiento de la rigidez en los primeros ciclos, para posteriormente estabilizarse.
- La rigidez de la placa varía en función de la densidad de la misma. Disminuyendo la densidad del cojín metálico podemos obtener soluciones más flexibles.
- Se puede establecer una relación lineal entre la rigidez estática y dinámica y la densidad.
- Para igual valor del diámetro de alambre y densidades similares, la geometría anular presenta una rigidez mayor que la geometría prismática.
- La resistencia eléctrica de la placa metálica es muy elevada, quedando fuera de los requisitos establecidos por la norma de referencia. Sin embargo, introduciendo una lámina de Poliamida 6 de 1,5 mm de espesor los resultados se asemejan a los obtenidos con una placa polimérica.
- Tras el ensayo de 250 horas en cámara de nieblas salinas no se apreció inicio de corrosión roja.

7. Bibliografía

- [1] J. P. Favero, «Introducción a la historia del carril ferroviario,» Gijón, 2003.
- [2] F. J. González Fernández y J. Fuentes Losa, Ingeniería Ferroviaria. Segunda edición actualizada y ampliada, Madrid, 2010.
- [3] D. Juárez Varón, R. Balart Gimeno, S. Ferrándiz Bou y D. García Sanoguera, «Estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos,» *3 Ciencias*, 2012.
- [4] D.-G. Park, «Prediction of Life Time of Rail Rubber Pad using Reliability Analysis Method,» *International Journal of Railway*, vol. 6, nº 1, pp. 13-25, 2003.
- [5] B. Böer, «An introduction to the climate of the United Arab Emirates,» *Journal of arid environments*, pp. 3-16, 1997.
- [6] Arabian Business, «Arabian Business,» 28 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.arabianbusiness.com/industries/transport/384542-rail-driving-growth-in-uae-transportation-infrastructure>. [Último acceso: 28 Julio 2018].
- [7] «Pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios,» *Boletín Oficial del Estado*, 17 Abril 2006.
- [8] I. A. Carrascal Vaquero, «Optimización y análisis de comportamiento de sistemas de sujeción para vías de ferrocarril de alta velocidad española,» 2010.
- [9] J. Alias y A. Valdés, La vía de ferrocarril, 1990.
- [10] M. J. Gutierrez Romero, J. Riley Edwards, C. P.L. Barkan, B. Wilson y J. Mediavilla, «Advancements in Fastening System Design for North American Concrete Crossties in Heavy-Haul Service,» de *Arema Annual Conference & Exposition*, Orlando, 2010.
- [11] RENFE, «Mantenimiento de infraestructuras de RENFE: N.R.V. 3-2-1.0. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica RN.,» Julio, 1982.

- [12] RENFE, «Mantenimiento de infraestructuras de RENFE: N. R. V. 3-2-1.1. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica P-2.,» Septiembre, 1985..
- [13] RENFE, «Especificación técnica para el suministro y homologación de piezas aislantes de la sujeción P-2.,» Septiembre, 1990..
- [14] RENFE, «Mantenimiento de infraestructuras de RENFE: N. R. V. 3-2-1.3. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica J-2.,» Febrero, 1994..
- [15] RENFE, «Mantenimiento de infraestructura. Plano P16.4721.00 de. Conjunto de la sujeción elástica J-2.».
- [16] RENFE, «Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-1.2. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica NABLA.,» Agosto, 1992..
- [17] RENFE, «Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-3.0. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica PANDROL.,» Septiembre, 1985..
- [18] F. Oliveros Rives, A. López Pita y M. J. Megía Puente, Tratado de ferrocarriles I. Vía., Rueda, 1977.
- [19] RENFE, «Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-2.1. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica SKL-12.,» Agosto, 1992..
- [20] RENFE, «Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-2.0. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica H.M.,» Julio, 1982..
- [21] A. López Pita, «La rigidez vertical de la vía y el deterioro de las líneas de alta velocidad,» *Revista de obras públicas*, nº 3415, pp. 7-23, 2001.
- [22] A. Vidal Muro y A. López Pita, «Vibraciones en las vías del ferrocarril».
- [23] G. Chen, W. Qian, J. Mo y M. Zhu, «Influence of the rail pad stiffness on the occurrence propensity of rail corrugation,» *J.Vib.Eng.Technol.*, vol. 4, nº 5, 2016.
- [24] J. Egana, J. Vinolas y M. Seco, «Investigation of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system,» *Wear*, vol. 4, nº 5, pp. 216-224, Julio 2006.
- [25] S. Kaewunruen y M. Remennikov, «An Experimental Evaluation of the Attenuation Effect of Rail Pad on Flexural Behaviour of Railway Concrete Sleeper under Severe Impact Loads,» *Australas. Struct. Eng. Conf.*, nº 51, pp. 26-27, 2008.

- [26] I. A. Carrascal Vaquero, «Atenuación frente a impacto en sistemas de sujeción ferroviaria de alta velocidad».
- [27] «<http://www.tejasa.es/Silentflex>,» [En línea].
- [28] I. A. Carrascal, A. Pérez, J. A. Casado, S. Diego, J. A. Polanco, D. Ferreño y J. J. Martín, «Development of metal rubber pads for high speed railways».
- [29] AENOR, «UNE-EN 13416-9+A1. Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 9: Determinación de la rigidez.,» 2012.
- [30] I. A. Carrascal, A. Pérez, J. A. Casado, S. Diego, J. A. Polanco, D. Ferreño y J. J. Martín, «Experimental study of metal cushion pads for high speed railways.,» 2018.
- [31] AENOR, «UNE-EN 13146-4. Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 4: Efecto de cargas repetidas.,» 2012.
- [32] AENOR, «UNE-EN 13146-5. Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 5: Determinación de la resistencia eléctrica.,» 2012.
- [33] Asociación Latinoamericana de Ferrocarriles , «Sujeciones de vía».
- [34] AENOR, «UNE-EN 13481-2. Aplicaciones ferroviarias. Vía. Requisitos de funcionamiento para los sistemas de sujeción. Parte 2: Sistemas de sujeción para las traviesas de hormigón.,» 2010.
- [35] I. A. Carrascal, J. A. Casado, S. Diego, J. A. Polanco, J. J. Martín y A. Pérez, «Placa elástica de asiento metálica para alta velocidad».

PLACA DE ASIENTO METÁLICA PARA SUPERESTRUCTURA FERROVIARIA DE ALTAS PRESTACIONES

Trabajo realizado por:

Pablo Setién González

Dirigido por:

Isidro Alfonso Carrascal Vaquero
Alejandro Pérez Núñez

Santander, Septiembre de 2018

Resumen

Con la implantación generalizada de las traviesas de hormigón en las vías de ferrocarril, los sistemas de sujeción han ido adaptándose a ello mediante el empleo de placas elásticas de asiento debido a la necesidad de incorporar un elemento amortiguador entre el carril y la propia traviesa con el fin de evitar, en la mayor medida posible, los impactos entre ambos elementos y disminuir la rigidez del conjunto que se ve aumentada por el hormigón. Actualmente, los materiales utilizados para fabricar las placas de asiento son poliméricos, bien sean termopolímeros, caucho, elastómeros... Las propiedades de estos materiales, dada su naturaleza, pueden verse alteradas por agentes ambientales como la temperatura, la humedad, los rayos UV, los hidrocarburos... Esto, sumado al desgaste y deterioro provocado por los esfuerzos mecánicos provenientes de la fatiga en compresión a causa de la circulación de los ferrocarriles hacen que la rigidez de la placa de asiento se vea modificada.

Para poder mejorar la respuesta de la placa de asiento frente a los agentes externos mencionados anteriormente se opta por diseñar y fabricar una placa de asiento metálica conformada por un alambre de acero inoxidable, tricotado, gofrado y prensado. Esta placa de acero, a diferencia de las placas realizadas en

material polimérico, tiene un comportamiento más uniforme independientemente de las condiciones ambientales y climáticas. Además, esta placa no sufre tanta rigidización por el paso continuo de las ruedas de los vehículos como los cojines fabricados con material polimérico. Además, la placa metálica no tiene un comportamiento dinámico tan variable como las poliméricas en función de la frecuencia de actuación de la carga externa.

El trabajo realizado para analizar la placa de asiento metálica ha sido el estudio de la rigidez tanto estática como dinámica, así como la influencia de la forma en el comportamiento de la misma. Para ello, se han realizado ensayos de rigidez estática y dinámica para dos tamaños de placa anular distintos, así como para un tamaño de placa prismática. El ensayo de la rigidez estática consiste en aplicar tres ciclos de carga consecutivos con unos 10 segundos de diferencia entre el final de un ciclo y el inicio del siguiente, y para el de rigidez dinámica se somete la placa a 1000 ciclos de carga con onda sinusoidal a tres frecuencias distintas de 5, 10 y 20 Hz. Las cargas aplicadas para cada ensayo son las que proporcionan una tensión equivalente a la de la norma de referencia. También se realizaron para la geometría prismática ensayos de fatiga de 350000 ciclos y otro hasta $3 \cdot 10^6$ ciclos, así como ensayos para la resistencia eléctrica y a la corrosión.

Las principales conclusiones que se obtienen de este estudio son:

- La placa metálica presenta una diferencia notable entre rigidez estática y dinámica.
- Los valores obtenidos se asemejan a una placa de polímero rígida como la placa de EVA.
- La densidad influye en la rigidez de la placa. Se establece una relación lineal entre las rigideces estática y dinámica y la densidad.
- A mismo tamaño de diámetro de alambre y densidades similares, la geometría anular presenta mayor rigidez que la prismática.
- Para el cumplimiento de la resistencia eléctrica es necesario colocar una lámina de poliamida.
- Buena resistencia a corrosión.

METALLIC RAIL PAD FOR HIGH PERFORMANCE RAILWAY SUPERSTRUCTURE

Work carried out by:

Pablo Setién González

Directed by:

Isidro Alfonso Carrascal Vaquero

Alejandro Pérez Núñez

Santander, September 2018

Abstract

Alongside the generalized use of the concrete railway sleepers, the fastening systems have been adapting to that by introducing rail pads due to the necessity of incorporate a shock absorber element between the rail and the sleeper, with the objective of avoid as much as possible the impacts between both components and to decrease the stiffness of the set, which is increased because of the concrete sleeper. Nowadays, the materials used to produce rail pads are polymers like thermopolymers, rubber, elastomers... Due to their nature, the properties of those materials may be altered due to environmental agents like the temperature, the humidity, the UV rays, the hydrocarbons... All that, added to the wear and tear caused by the mechanical efforts coming from compressive fatigue provoked by the railways circulation, modify the stiffness of the polymeric rail pad.

To improve the response of the rail pads to the external agents mentioned before, it is decided to design and produce a metallic rail pad made by knitted, embossed and pressed stainless-steel wire. Unlike the polymeric rail pads, the metallic one provides a constant performance independently of the weather and the environmental conditions. In addition, these pads' stiffness isn't so modified as the

polymeric pads' because of the railways activities. Furthermore, the dynamic performance of the metallic pad is not as variable as the polymeric ones as a function of the frequency of the external load.

The work realized to analyze the metallic rail pad has been the study of its static and dynamic stiffness, and the influence of the form in the pad's performance. For this purpose, static and dynamic stiffness tests have been carried out for two different sizes of ring- shaped rail pads, as for a square-shaped rail pad. The static stiffness test consists in applying three consecutive loading cycles, with a 10 seconds rest between the end of a cycle and the start of another one, and for the dynamic stiffness test the pad is putted through 1000 sine wave type load cycles at three different frequencies: 5, 10 and 20 Hz. The loads applied to each test are the ones that provide an equivalent stress to the reference standard. Some tests were also carried out only for the square-shaped pad, such as two fatigue tests of 350000 and $3 \cdot 10^6$ cycles, an electric resistance test and a corrosion resistance test.

The main conclusions obtained in this study are:

- The metallic pad presents a remarkable difference between the static and the dynamic stiffness.
- The obtained values are similar to the ones obtained with a hard polymeric pad, like the EVA pad.
- There is a linear dependence between the static & dynamic stiffness and the density of the metallic pad.
- If wire diameter is kept constant, and for similar densities, the ring-shaped pad has a higher stiffness than the square-shaped one.
- It is necessary to introduce a polyamide sheet to improve the electric resistance.
- The metallic pad has a great corrosion resistance.